

UNIVERZITA KARLOVA

Přírodovědecká fakulta

Ústav pro životního prostředí

Studijní program: Ekologie a ochrana prostředí

Studijní obor: Ochrana životního prostředí



Kateřina Fialová

Využití bezpilotních leteckých prostředků v precizním zemědělství

Use of unmanned aerial vehicles for precision agriculture

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Luboš Matějček, Ph.D.

Praha 2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze dne 14. 8. 2017

.....

podpis

Poděkování

Tímto bych ráda poděkovala svému školiteli panu Ing. Luboši Matějčíčkovi, Ph.D. za vedení, připomínky a čas, který mi věnoval. Dále bych tímto ráda poděkovala panu doc. Mgr. Jiřímu Reifovi, Ph.D. za konzultace a odborné rady, a v neposlední řadě mé rodině za obrovskou podporu a trpělivost, kterou měla během celého mého studia.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá využitím bezpilotních leteckých prostředků (UAV) v precizním zemědělství. UAV jsou jedním z mnoha nástrojů využívaných k dálkovému průzkumu Země (DPZ), jejichž úkolem je sledování objektů bez přímého fyzického kontaktu. Za posledních 20 let došlo k rozšíření UAV v nejrůznějších oblastech, masivně pak právě v precizním zemědělství.

Práce srovnává UAV s klasickými prostředky DPZ a prostřednictvím ukázek reálného nasazení UAV ve vybraných případových studiích - *Applications of Low Altitude Remote Sensing in Agriculture, Weed Mapping using Object-Based Analysis of UAV images, Low-altitude, high-resolution aerial imaging systems for row and field crop phenotyping a Estimating Biomass using Crop Surface Models* ukazuje široké možnosti sběru, zpracování a vyhodnocení dat, pokrývající celé spektrum důležitých informací, využitelných v precizním zemědělství.

UAV a jejich použití v precizním zemědělství je oblastí, kterou čeká dynamická expanze a která přináší oproti standardnímu sběru dat, jen samá pozitiva. Největší výhodou je obrovská flexibilita jak z hlediska nasazení, tak z hlediska osazení senzory, vysoká přesnost pořízených dat, jednoduchost obsluhy, finanční dostupnost a návazně na to i dostupnost softwaru, specializovaného k zpracování takto získaných dat. Jedinou možnou nevýhodou stojící za zmínku je relativně malá kapacita akumulátorů, která v současné době umožňuje operační dobu cca 15 - 30 minut.

Zároveň s výše zmíněnými výhodami jdou i výhody ekologické, a to jak při samotném sběru dat, tak zvláště pak po aplikaci výsledků v precizním zemědělství. Myšleno je tím např. snížení utužení půdy v důsledku zbytečných pojezdů těžké techniky po poli, snížení emisí, minimalizace použití pesticidů a hnojiv a tím snížení jejich dopadů na obhospodařovanou krajinu a její okolí, zvýšení výnosů, snížení eutrofizace vod kvůli splachům a obecně, zlepšení ekosystému jako celku.

Klíčová slova: bezpilotní letecký prostředek (UAV), precizní zemědělství, dálkový průzkum Země (DPZ)

Abstract

This bachelor thesis deals with the use of unmanned aerial vehicles (UAV) in precision agriculture. UAVs are one of the many tools used in Earth remote sensing (RS), their task is to monitor object without physical contact. Over the past 20 years, UAVs have been expanding in a wide variety of areas, massively in precision agriculture.

This thesis compares the UAV with the classical means of RS and through demonstrations of real UAV deployment in selected case studies - *Applications of Low Altitude Remote Sensing in Agriculture*, *Weed Mapping using Object-Based Analysis of UAV images*, *Low-altitude, high-resolution aerial imaging systems for row and field crop phenotyping* and *Estimating Biomass using Crop Surface Models* show wide possibilities of data collection, processing and evaluation, covering the full spectrum of important information usable in precision agriculture.

UAVs and their use in precision agriculture is an area that is expected to expand dynamically and which, compared to standard data collection, only positives. The greatest advantage is immense flexibility in terms of both deployment and sensor layout, high accuracy of data acquisition, ease of operation, affordability and, consequently, the availability of software specialized in processing such data. The only possible disadvantage is the relatively small capacity of the batteries, which currently allows for an operating time of about 15 - 30 minutes.

Simultaneously with the benefits mentioned above, the ecological benefits also arise, both in data collection itself and especially after application of the results in precision agriculture. For example, reducing soil compaction due to unnecessary heavy machinery movements, reducing emissions, minimizing the use of pesticides and fertilizers, and reducing their impacts on the farmland and its surroundings, increasing yields, reducing eutrophication of water due to discharges and, in general, improving the ecosystem as a whole.

Key words: unmanned aerial vehicles (UAVs), precision agriculture, remote sensing (RS)

1 Obsah

Prohlášení.....	3
Poděkování.....	5
Abstrakt.....	6
Abstract	7
Seznam použitých zkratk	10
Seznam obrázků	11
1 Úvod	13
2 Bezpilotní letecké prostředky a systémy	15
2.1 Původ slova dron.....	16
2.2 Rozdělení.....	16
2.2.1 Typy dronů podle konstrukce	16
3 Precizní zemědělství	19
3.1 Uplatnění precizního zemědělství ve světě	20
3.2 Metody sběru dat využívané v precizním zemědělství	21
3.2.1 Kontaktní sběr dat	21
3.2.2 Bezkontaktní sběr dat.....	21
3.3 Výstupy získaných analyzovaných dat.....	24
3.3.1 Výnosové mapy.....	24
3.3.2 Aplikační mapy	25
3.4 Potenciál a výhody využití UAV v precizním zemědělství	31
4 Případové studie použití dronů v praxi.....	34
4.1 Využití UAV pro potřeby monitoringu	34
4.2 Využití UAV pro mapování zaplevelení	36
4.3 Využití UAV pro fenotypizaci pole	37
4.4 Využití UAV pro odhad biomasy.....	39
4.5 Zhodnocení případových studií	41
4.6 Zpracování získaných dat.....	42
5 Diskuse a závěr	44
6 Bibliografie	46

Seznam použitých zkratk

BAT	best available technique - nejlepší dostupná technika
DPZ	dálkový průzkum Země (angl. RS remote sensing)
DMP	digitální model povrchu (angl. DSM digital surface model)
GAI	green area index - vegetační index
GIS	geographic information system - geografický informační systém
GNSS	global navigation satellite system - globální navigační satelitní systém
GPS	global position system - globální polohovací systém
IMU	inertial measurement unit - inerciální měřicí jednotka
IR	infra-red spectrum - infračervené spektrum
LAI	leaf area index - index listové plochy
NDVI	normalized difference vegetation index - normalizovaný vegetační index
NIR	near infra-red spectrum - blízké infračervené spektrum
R	rozpětí (rozdíl mezi největším a nejmenším výsledkem v sérii stanovení)
RC	remote control - dálkové ovládání
RGB	red green blue - červená zelená modrá
RPAS	remote piloted aircraft system - dálkově ovládaný letecký systém
SAVI	soil adjusted vegetation index - půdně upravený vegetační index
SR	simple ratio - jednoduchý poměr (vegetační index)
UAV	unmanned aerial vehicle - bezpilotní letecký prostředek
UAS	unmanned aerial system - bezpilotní letecký systém
VIS	visible spectrum - viditelné spektrum

Seznam obrázků

Obrázek 1 Pilot ovládá dron, který je na dohled pomocí dálkového ovládání (International Civil Aviation Organization, 2011).....	15
Obrázek 2 Model letounu plně autonomní, často využívaný pro mapování v precizním zemědělství (“eBee Plus: senseFly SA,” 2017)	17
Obrázek 3 Model vrtulníku často využívaný pro aplikaci pesticidů v precizním zemědělství (Corporation, 2016).....	17
Obrázek 4 Model hexakoptéry často využívaný k získávání dat v precizním zemědělství (“Agriculture - Efficient use of resources - see what grows,” 2017)	18
Obrázek 5 Ukázka procesu precizního zemědělství ve zjednodušeném diagramu (Comparetti, 2011).....	20
Obrázek 6 Spektrální křivky různých typů povrchu (upraveno podle JPL) (Cenia, 2016).....	22
Obrázek 7 Názorná ukázka metod dálkového průzkumu - pasivní (vlevo), aktivní (vpravo) (“A to Z About Active and Passive Remote Sensing,” 2017).....	23
Obrázek 8 Ukázka výnosové mapy (Vojtěch & Neudert, 2016).....	24
Obrázek 9 Ukázka aplikační mapy pro rozdílnou potřebu přihnojení dusíkem (Krček, 2017)	26
Obrázek 10 Ukázka multispektrálního snímkování (zleva: RGB, monochromatické, IR) (Homeland Surveillance and Electronics, 2015).....	27
Obrázek 11 Ukázka hyperspektrálního snímkování (Short, 2017)	27
Obrázek 12 Ukázka termálního snímkování, kde modrá barva značí dostatek vody v půdě a červená značí suchou půdu (Nixon, 2017)	28
Obrázek 13 Ukázka ortofoto pole pořízené UAV (vlevo) a snímek téhož pole s vypočteným NDVI (vpravo) (VanderLeest, Bergman, Darr, & Murphy, 2016), červené zbarvení zde značí zhoršený zdravotní stav rostlin.....	29
Obrázek 14 Ukázka proměření stavu dusíku N testerem (vlevo) návrh aplikační mapy pro přihnojení dusíkem (vpravo) (Lukas et al., 2012)	30

Obrázek 15 Porovnání rozlišení snímků pořízeného družicí a UAV (Rokhmana, 2015).....	33
Obrázek 16 Ukázka snímku pole v pásmu NIR (vlevo) a vypočtené NDVI (vpravo) (Zhang et al., 2014)	35
Obrázek 17 Ukázka snímku pole v pásmu NIR (nahore) a vypočtené NDVI (dole) (Zhang et al., 2014)	35
Obrázek 18 Ukázka monochromatického snímku pole (Zhang et al., 2014)	36
Obrázek 19 Ukázka zaplevelení a) nízké zaplevelení, b) střední, c) vysoké - fotografie pořízené ze země (nahore) a pomocí UAV (dole) (Peña, Torres-Sánchez, de Castro, Kelly, & López-Granados, 2013)	37
Obrázek 20 Ukázka růstu brambor 37 dní po sadbě a) v nepravých barvách (R, G, NIR jako RGB pásmo, b) NDVI v čenobílém odstínu, c) zvýrazněné barvy pro lepší vizualizaci (Sankaran et al., 2015)	39
Obrázek 21 Ukázka členění experimentální plochy (Juliane Bendig et al., 2014)	40
Obrázek 22 Ukázka zpracovaných dat - digitální model terénu, odvozená výška porostu (Juliane Bendig et al., 2014).....	41

1 Úvod

Bezpilotní letecké prostředky jsou jedním z nástrojů pro sběr dat - v našem případě se zaměřením na oblast životního prostředí. Pořizování dat funguje na stejném principu jako u pilotovaných letadel či družic, jen je ekonomicky mnohem dostupnější a vzhledem k tomu, že jsou data snímána z mnohem menších výšek, jsou i přesnější (Eisenbeiss, 2011). I výroba a provoz bezpilotních leteckých systémů je výrazně šetrnější k životnímu prostředí.

Zemědělství patří od pradávna k nejzákladnějším vědám vůbec, protože produkce potravin je jednou z elementárních věcí, které člověk potřebuje pro své přežití. Lidská populace v posledních letech výrazně roste, a proto je snaha co nejvíce a nejefektivněji zvýšit produkci potravin. Jedním ze způsobů jak toho docílit je tzv. precizní zemědělství, které se řídí principy udržitelného rozvoje a pomocí zásady nejlepší dostupné techniky (tzv. zásada BAT), chce docílit co nejvyššího výnosu tak, že k obhospodařovanému pozemku přistupuje jako k prostorově heterogennímu systému a nikoli jako k homogenní ploše (Ali, 2013). Za pomoci globálních polohovacích systémů (GPS), globálních navigačních systémů (GNSS) a pomocí speciálních senzorů připevněných na UAV, lze vytvořit speciální tzv. aplikační mapy, podle kterých se pak řídí péče o kultivovanou plochu, její zavlažování, hnojení či aplikace pesticidů (Pierce & Nowak, 1999). Primárním cílem je zvýšit produkci, nicméně další výhodou, která přímo souvisí s individuálním přístupem k jednotlivým odchylkám v dané lokalitě je i snížení množství použitých hnojiv, a tím zabránění nechtěné eutrofizaci (Ryant, 2001). Dalším výstupem jsou pak tzv. výnosové mapy, které určují míru úspěšnosti učiněných zásahů.

K mapování zemědělské krajiny se běžně používají pilotovaná letadla a satelity, pro zasazení daného území do širšího kontextu krajiny, který může značně ovlivnit probíhající místní procesy. Bezpilotní letecké prostředky jsou využívány zejména jako doplněk k mapování území menšího rozsahu s větší přesností, nižšími ekonomickými náklady nejen na pořízení stroje, ale i na jeho provoz, jednodušším ovládáním, nižšími emisemi atd. (Vilém Pechanec, Aleš Vávra, 2014). Dále jsou zde pak používány manuální senzory, např. na měření pH půdy, obsahu dusíku (tzv. N testery) aj. (Škoda, 2014).

Vědecké práce se často zabývají buď pouze technickými parametry bezpilotních leteckých systémů, nebo naopak pouze precizním zemědělstvím obecně a jeho využitím zejména z důvodu maximalizace výnosů s minimálními náklady. Když spojíme tyto dva rozdílné obory dohromady, můžeme vytvořit komplexní představu o dopadech hospodaření na okolní krajinu, což nám

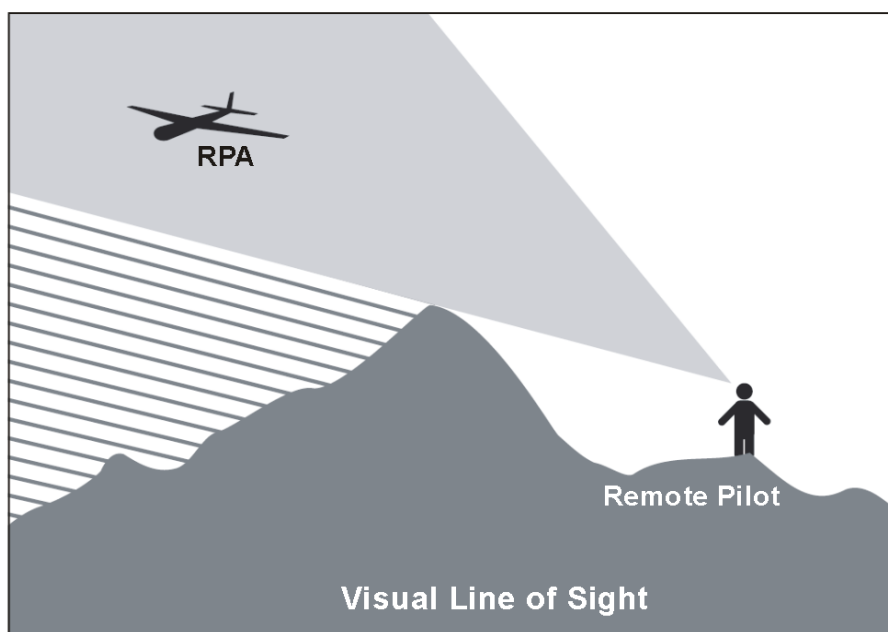
umožní lépe a včas reagovat na případné nežádoucí stavy, a právě tím se zabývá tato bakalářská práce.

2 Bezpilotní letecké prostředky a systémy

Označení bezpilotní letecké prostředky (unmanned aerial vehicle - UAV), či bezpilotní letecké systémy (unmanned aircraft system - UAS) je používáné především v anglofonních zemích. V Evropě se upřednostňuje pojem dálkově řízené letecké prostředky (Karas & Tichý, 2016).

Dálkově řízené letecké prostředky jsou často obecně pro zkrácení a zjednodušení nazývány drony (Grygar, Nejedl, & Kříž, 2017). Toto označení se používá zejména ve sdělovacích prostředcích a při styku s veřejností.

Jedná se o létající zařízení, na jejichž palubě není pilot. Pilot je ovládá pomocí vizuálního kontaktu ze země, nebo pomocí kamery připevněné na dronu, snímající okolí s přenosem na monitor, nebo do brýlí pilota v reálném čase, (tzv. first person view) (Issod, 2017), (Karas & Tichý, 2016), eventuálně se samy pohybují po předem naprogramované trajektorii.



Obrázek 1 Pilot ovládá dron, který je na dohled, pomocí dálkového ovládání (International Civil Aviation Organization, 2011)

Celý systém je pak soubor všech potřebných prvků určených k provozu a k návratu letadla, tzn. bezpilotní letadlo, řídicí stanice a spojení pro kontrolu řízení stroje.

Také je možné předem naprogramovat let tak, aby do něj pilot nemusel zasahovat a stroj se sám bezpečně vrátil (Marshall, Barnhart, Hottman, Shappee, & Most, 2011). Nicméně tento postup pak naráží na legislativní podmínky a podmínky letového provozu, kterými se ale v této práci nebudu podrobněji zabývat.

2.1 Původ slova dron

Slovo dron je z anglického slova *drone*, jež má mnoho významů (Karas & Tichý, 2016). Tento název vznikl nejspíše díky podobnosti pravidelného zvuku motoru se zvukem včelího roje, respektive jeho samců, kteří se v angličtině nazývají právě *drones* (Harper, 2017). Označení dron je variantou neformálního označení bezpilotních leteckých prostředků (Rouse, 2016).

2.2 Rozdělení

Drony lze dělit mnoha způsoby, např. podle účelu, doletu, rychlosti, letové hladiny, nosnosti, velikosti, stavby konstrukce aj. Nejjednodušší a nejzákladnější rozdělení je však podle typu konstrukce, která je charakteristická a ve které dále můžeme rozlišovat již zmíněné atributy (Brown, 2017), (Draganfly, 2008), (ProPhotoUAV, 2016), (Marshall et al., 2011).

2.2.1 Typy dronů podle konstrukce

2.2.1.1 Letoun

Definice slova letoun říká, že se jedná o letadlo těžší než vzduch, které ke svému pohybu využívá aerodynamických sil, díky pevně připojeným, speciálně tvarovaným plochám průřezu křídel, okolo kterých proudí vzduch. Letoun se tedy z fyzikálních důvodů musí neustále pohybovat určitou rychlostí dopředu, aby vztlaková síla byla dostatečná na udržení stroje ve vzduchu. Tento pohyb dopředu zajišťuje zpravidla spalovací nebo elektrický motor s tažnou nebo tlačnou vrtulí v některých případech s proudovou turbínou. Pokud z jakéhokoli důvodu motor selže, letoun ztrácí rychlost, kvůli nedostatečné rychlosti přestávají fungovat vztlakové síly a letoun padá k zemi. Když je správně vyvážen, padá tzv. klouzavým letem, při kterém se pohybuje více méně rovnoměrně pod určitým úhlem k zemi. Pokud však motor funguje jak má, k plynulému letu není potřeba velká energie. Díky vztlakové síle stačí překonat jen odpor vzduchu a to tak, aby vztlaková síla byla větší nebo rovna síle tíhové (Karas & Tichý, 2016), (Marshall et al., 2011).



Obrázek 2 Model letounu plně autonomní, často využívaný pro mapování v precizním zemědělství (“eBee Plus: senseFly SA,” 2017)

2.2.1.2 Vrtulník

Vrtulník patří stejně jako letoun do definice létajících prostředků těžších než vzduch a je také nadnášen aerodynamickými vztlačovými silami. Na rozdíl od letounu má však vrtuli rotující horizontálně a nemusí se proto neustále pohybovat vpřed, protože vrtule vytváří vztlak na místě. Nežádoucí rotaci je pak zabráněno malou ocasní vrtulí, která se pohybuje vertikálně, a zároveň se její pomocí ovládá vrtulník do stran, nebo se používají dva rotory umístěné nad sebou s opačnou rotací. Řízení vrtulníku je o něco náročnější. Zpravidla je opatřen celou řadou stabilizačních systémů. Když vysadí motor, vrtulník padá přímo k zemi, protože není aerodynamicky stabilní jako letoun. Když pilot včas nastaví záporný náběh listů rotoru, rotor během klesání může nabrat dostatečné otáčky, aby setrvačností pilotovi umožnila relativně bezpečné přistání (Karas & Tichý, 2016), (Marshall et al., 2011).



Obrázek 3 Model vrtulníku často využívaný pro aplikaci pesticidů v precizním zemědělství (Corporation, 2016)

2.2.1.3 Multikoptéry

Multikoptéry jsou zcela unikátním typem létajících prostředků. Jako pohon vytvářející potřebný vztlak, používají sudý počet rotorů. Na rozdíl od vrtulníků, které se ovládají nastavením úhlu náběhu listů rotoru, multikoptéry využívají pro ovládání nastavitelnou rychlost otáček jednotlivých rotorů. Sudý počet rotorů je z toho důvodu, aby se vyrušil kroutivý moment, který vzniká společně se vztakovou silou na každém rotoru. Proto je polovina rotorů pravotočivých a polovina levotočivých. Směr letu pak záleží na výslednici působících sil. Například pro přímý let je potřeba snížit otáčky rotorů v přední části a zvýšit v části zadní. To samé platí o ovládání do stran. Vztaková síla při těchto manévrech zůstává stejná, převládá však kroutivý moment, který ovládá otáčení multikoptéry. Podle počtu rotorů rozlišujeme multikoptéry na kvadrokoptéry (čtyři rotory), hexakoptéry (6 rotorů), oktokoptéry (8 rotorů), dodekakoptéry (12 rotorů) a hexadekakoptéry (16 rotorů) (Issod, 2017).



Obrázek 4 Model hexakoptéry často využívaný k získávání dat v precizním zemědělství
("Agriculture - Efficient use of resources - see what grows," 2017)

3 Precizní zemědělství

Precizní zemědělství je jedním z mnoha typů zemědělství (např. ekologické, biodynamické, integrované, plantážní atd.), jedná se o mezioborovou disciplínu, která používá moderní technologie pro zlepšení výnosu zemědělské půdy v závislosti na její prostorové a časové variabilitě. Jinými slovy řečeno, na základě lokálních odlišností půdy, jsou sestaveny přesné plány pro podporu produkce daného území (Kumhála, 2017). Cílem je zasáhnout včas tam, kde je potřeba a v množství v jakém je potřeba (Pierce & Nowak, 1999), (Ryant, 2001).

Úspěchem vysokého výnosu je kombinace všech faktorů, nikoli jen těch nejdůležitějších. Tzv. Liebigův zákon minima říká, že limitujícím prvkem je právě ten prvek, který je v minimu (Gorban, Pokidysheva, Smirnova, & Tyukina, 2011), (Krebs, 2008). Naopak platí, že organismy tolerují různé rozpětí určitých faktorů, které když jsou překročeny, tak je ovlivňují negativně. Tomuto jevu se říká tzv. Shelfordův zákon tolerance (Krebs, 2008). Přičemž oba tyto zákony platí současně.

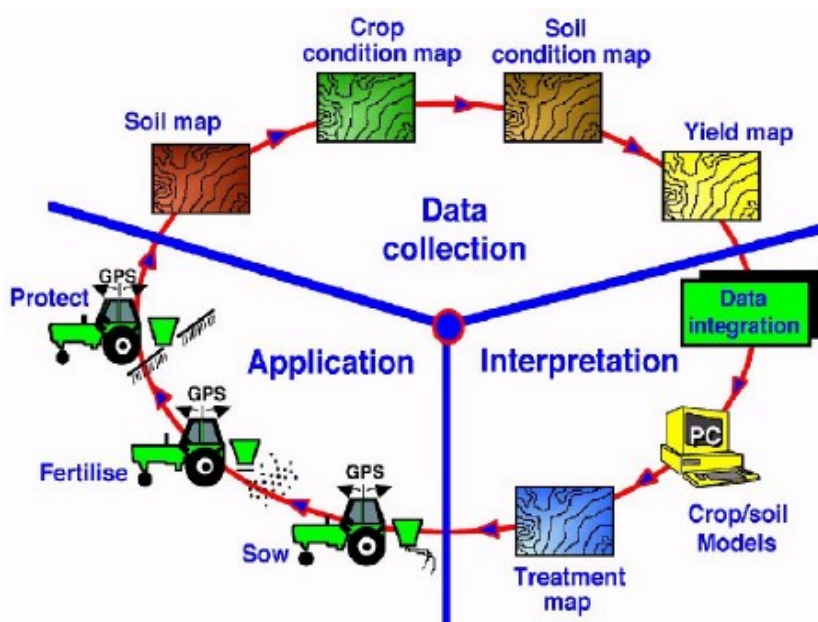
Precizní zemědělství je známé od 80. let 20. století (Paxton et al., 2011), (Sasao & Shibusawa, 2000), nicméně teprve za poslední desetiletí zaznamenalo výrazný nárůst (Stafford, 2000). Řídí se několika zásadami. První z nich je tzv. zásada nejlepší dostupné techniky (tzv. zásada BAT), dále má snahu dodržovat princip trvale udržitelného rozvoje a to tím způsobem, že dodává pouze takové množství živin a pesticidů, aby byli co nejmenší negativní dopady na okolní prostředí a přesto dosaženo co nevyšších zisků s maximální možnou úsporou nákladů.

Za úspěchem precizního zemědělství je znalost variability prostředí (Ali, 2013), (Sasao & Shibusawa, 2000). Abychom k pozemku mohli přistupovat jako k heterogennímu prostředí a věděli jsme, kde je potřeba provést jaký úkon a v jaké intenzitě, je nutné znát biologické procesy na dané lokalitě, vlastnosti a aktuální stav půdy i dané plodiny (Stafford, 2000). Tyto odlišnosti se mohou nacházet i v rámci velmi malé plochy (Gemtos, Fountas, Tagarakis, & Liakos, 2013).

Pro sběr dat se v precizním zemědělství používají nosiče senzorů, jako jsou satelity, letadla nebo bezpilotní letecké prostředky. Senzory snímají povrch zemědělské krajiny v různých částech spektra (viditelné, multispektrální, hyperspektrální), data jsou dále zpracována a vyhodnocena (Vilém Pechanec, Aleš Vávra, 2014). Výstupem veškerých zpracovaných dat jsou tzv. aplikační mapy.

Precizní zemědělství je komplexní způsob obhospodařování krajiny, skládající se z několika dílčích prvků:

- 1) sběr vstupních dat (zjišťování stavu půdy a porostu - mapování)
- 2) analýza získaných dat (vytvoření aplikačních map)
- 3) provedení dané operace (hnojení, postřik pesticidy)
- 4) zhodnocení míry úspěšnosti (tvorba výnosových map)



Obrázek 5 Ukázka procesu precizního zemědělství ve zjednodušeném diagramu
(Comparetti, 2011)

Sběr dat může probíhat buď přímým sběrem, nebo pomocí dálkového průzkumu Země.

3.1 Uplatnění precizního zemědělství ve světě

Precizní zemědělství je rozšířeno po celém světě. Nejvíce se dnes využívá zejména ve vyspělých státech. V Evropě se jedná hlavně o Nizozemí, Dánsko, Velkou Británii a Německo. Prvenství ve světě drží Spojené státy americké (Borne, 2015). Za podpory vyspělých států nachází uplatnění i v rozvojových zemích (Fisher, 2012), (Mondal & Basu, 2009).

Společnost SenseFly je švýcarská komerční dceřiná společnost společnosti Parrot Group, zabývající se zejména tvorbou a inovací UAV používaných přímo pro mapování či potřeby precizního zemědělství. Tzv. eBee jsou bezpilotní letecké prostředky, schopné autonomního

provozu po předem naplánované trase. Jedná se o profesionální bezpilotní letecké prostředky využívané v precizním zemědělství ke sběru dat a ač společnost vznikla teprve v roce 2009, je v tomto oboru jedničkou na trhu. Své produkty neustále zdokonaluje, má více než 200 prodejních míst a exportuje do více než 100 zemí světa (SenseFly, 2017).

Dalšími společnostmi zabývajícími se výrobou dronů a programů přizpůsobených pro potřeby precizního zemědělství je PrecisionHawk. Jedná se o společnost založenou v roce 2010, se sídlem v Severní Karolině a pobočkou v Torontu (PrecisionHawk, 2017). Další společností s podobnou náplní je např. HoneyComb (HoneyComb, 2017).

3.2 Metody sběru dat využívané v precizním zemědělství

Metody sběru dat pro precizní zemědělství lze rozdělit na tzv. kontaktní a bezkontaktní.

Obě metody zahrnují tři základní kroky a to: sběr dat, jejich následná analýza a přiměřený zásah, učiněný na základě vyhodnocených dat.

Podle způsobu vyhodnocení získaných informací lze bezkontaktní metody sběru dat dále dělit na tzv. online systémy, jinak také nazývané on-the-go systémy a offline systémy. Rozdíl je v tom, že při online sběru dat jsou všechny tři úkony prováděny v jednom kroku. Informace jsou hned vyhodnocovány a pěstební úkon prováděn ihned po jejich zpracování v rámci jedné operace. Při offline sběru jsou naopak jednotlivé kroky rozděleny a úkony jsou prováděny s časovou prodlevou. Oba tyto způsoby mají své výhody a nevýhody a jejich kombinací lze docílit nejvyšší možné účinnosti (Lukas et al., 2012).

3.2.1 Kontaktní sběr dat

Kontaktní metodou je myšleno získávání informací přímým kontaktem. Ten může být destruktivní, tzv. přímý rozbor rostliny či odběr půdy, nebo nedestruktivní, zpravidla na principu odrazivosti, měřený pomocí ručních senzorů. Příkladem může být N tester nebo pH metr.

3.2.2 Bezkontaktní sběr dat

Bezkontaktní metodou je pak myšleno získávání dat pomocí senzorů připevněných na pozemních či leteckých nosičích, pracujících na principu dálkového průzkumu Země.

Dálkový průzkum Země

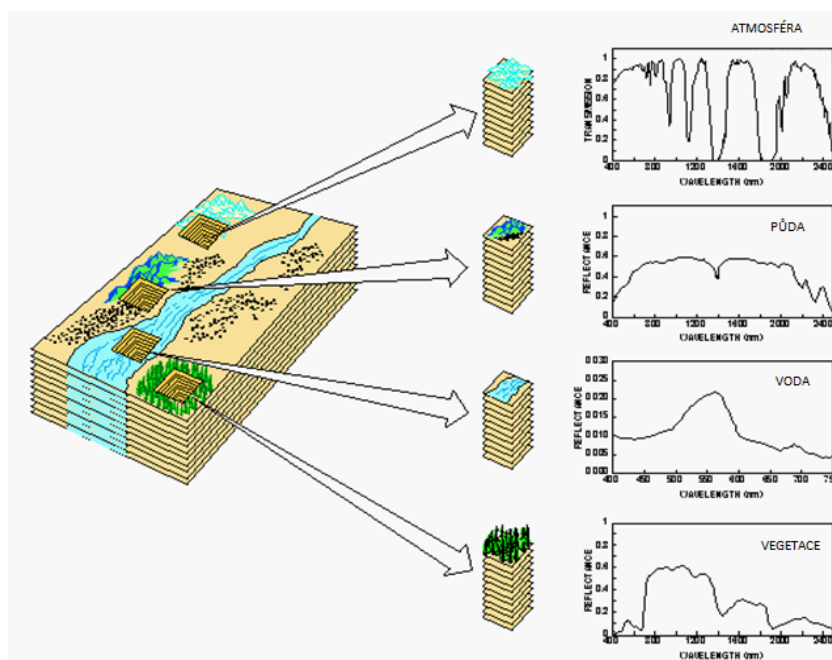
Dálkový průzkum Země (DPZ), znamená získávání informací na dálku, bez přímého kontaktu s pozorovanými objekty. Definice DPZ je mnoho (Campbell, Wynne, Guilford, & Lin, 2011), (Lillesand, Kiefer, & Chipman, 2004), (Tang & Li, 2014), nicméně všechny popisují jinými slovy stejnou věc. DPZ je způsob získávání informací o objektech prostřednictvím senzorů a snímků. Zpravidla se jako nosiče různých senzorů používají letadla a družice.

DPZ se dělí na dvě části, a to na sběr dat a jejich přenos a na jejich analýzu a následnou interpretaci (Zemek et al., 2014).

A další možné dělení je podle způsobu sběru dat. Jedná se buď o tzv. konvenční metodu, kdy výstupem jsou fotografie, nebo o nekonvenční metodou, kdy výstup je tvořen videozáznamem (Svatoňová & Lauermann, 2010).

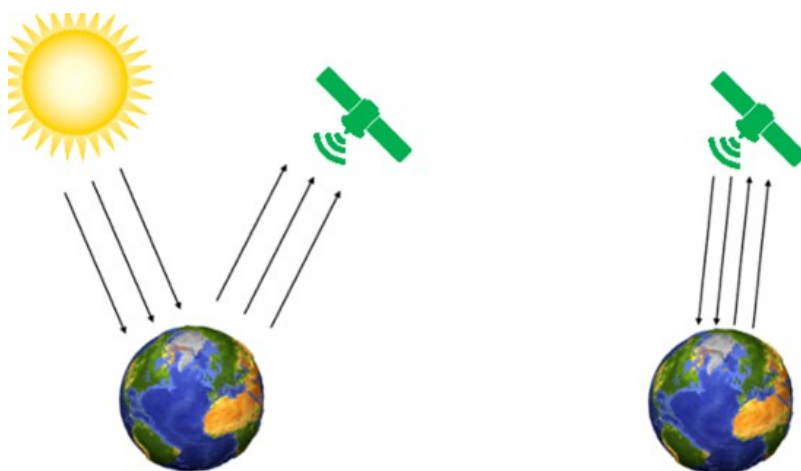
Princip DPZ

Každý objekt na Zemi je ovlivňován svým okolím a zároveň sám okolí ovlivňuje. Toto je charakteristické pro všechny objekty. Záleží na jejich typu, velikosti, barvě, teplotě atd. Každý objekt se chová jinak a tím o sobě poskytuje určité informace. Tyto informace jsou do okolí předávány ve formě silového pole, respektive odraženého nebo vyzářeného elektromagnetického záření, které lze změřit. A právě měření elektromagnetického pole, je podstatou DPZ (Zemek et al., 2014).



Obrázek 6 Spektrální křivky různých typů povrchu (upraveno podle JPL) (Cenia, 2016)

Metody dálkového průzkumu dále dělíme na pasivní, kdy zdrojem energie je Slunce a aktivní, kdy zdrojem energie je senzor (Mai, 2017).



Obrázek 7 Názorná ukázka metod dálkového průzkumu - pasivní (vlevo), aktivní (vpravo)
(“A to Z About Active and Passive Remote Sensing,” 2017)

Částí elektromagnetického spektra je záření, které je viditelné pro lidské oko. Nicméně viditelná část tvoří jen zlomek celého elektromagnetického záření a pro dálkový průzkum Země jsou podstatné i jeho ostatní složky. Jednou z velmi často využívaných je např. blízké infračervené nebo mikrovlnné spektrum. Na druhou stranu, ultrafialové záření je používáno jen ve výjimečných případech, protože u něj dochází k velkému rozptylu v atmosféře (Zemek et al., 2014).

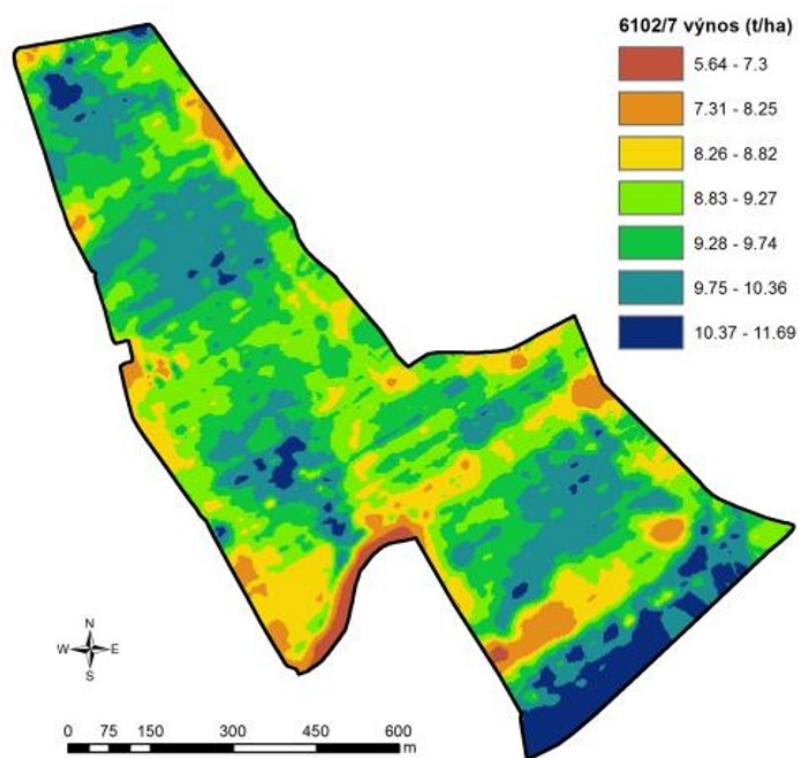
Při sběru samotných dat je nutné pořizovat i tzv. doprovodná, popřípadě i doplňková měření. Doprovodná měření se zaznamenávají v průběhu samotného letu a jedná se např. o polohu letadla, jeho výšku, rychlost a úhel náklonu. To vše je měřeno pomocí inerciální měřicí jednotky (inertial measurement unit - IMU) a globálního navigačního satelitního systému (global navigation satellite system - GNSS). Tyto informace jsou nakonec použity pro korekci získaných dat do souřadnicového systému pro snadnější a přesnější zpracování. Doplňkovými údaji jsou pak např. data zaznamenávající meteorologické podmínky, které by mohly ovlivnit měření. Pro ještě větší přesnost DPZ často probíhají tzv. podpůrná terénní měření, která probíhají na zemi. Do této kategorie patří např. měření skutečné odrazivosti daného povrchu, přesná poloha vybraných kontrolních bodů, zaznamenávání místních meteorologických podmínek aj. To vše probíhá ideálně současně s leteckým sběrem dat, aby se zvýšila přesnost měření (Zemek et al., 2014).

3.3 Výstupy získaných analyzovaných dat

3.3.1 Výnosové mapy

Výnosové mapy jsou mapy, které monitorují celkovou výnosovou úroveň pozemku po přepočtení z absolutního výnosu na relativní. Úroveň výnosu je pak procentuální zastoupení výnosu na daném místě k průměrnému výnosu celého pozemku během roku.

Z jednotlivých výnosových map vytvořených během roku se vytvoří tzv. normalizované výnosové mapy, kde se data upravují tak, že se odstraní odlehlé nebo chybné hodnoty, popřípadě se zde zohledňuje i význam vlhkosti zrna a pomocí interpolace se vytvoří rastrové mapy, které vyjadřují výnos již v absolutních jednotkách. Nakonec se tyto normalizované výnosové mapy z jednotlivých let zprůměrují a vytvoří se výnosová mapa za určité delší období (Vojtěch & Neudert, 2016), (Lukas et al., 2012).



Obrázek 8 Ukázka výnosové mapy (Vojtěch & Neudert, 2016)

Sběr dat pro výnosové mapy probíhá při sklizni, kdy v dnešní době je většina sklízecích strojů vybavena speciálními senzory. S použitím GPS jsou pak data dále zpracována a je vytvořena požadovaná výnosová mapa, která je podkladem pro zhodnocení úspěšnosti pěstebních úkonů (Škoda, 2014).

3.3.2 Aplikační mapy

Aplikační mapa je velice detailním výsledkem analýzy získaných údajů a udává přesné informace o stavu půdy, plodiny, o tom, kde je potřeba zvýšit a kde snížit přísun živin, aplikaci postřiku, popřípadě změnit techniku obhospodařování půdy. Cílem je snížit náklady a zároveň maximalizovat výnos (Křepelka, 2010), (Stoszek, 2009). Pomocí aplikačních map máme znalosti o heterogenitě v rámci pozemku a lze tak přistupovat ke konkrétnímu místu individuálně, dle potřeby (Ali, 2013).

Abychom mohli aplikační mapy vytvořit, je potřeba nejprve získat primární údaje, které se dále zpracovávají. Tato data lze získat různými způsoby. Nejčastějšími nosiči senzorů pro dálkové snímání povrchu jsou bezpilotní letecké prostředky, pilotovaná letadla a v neposlední řadě satelity (Lukas et al., 2012).

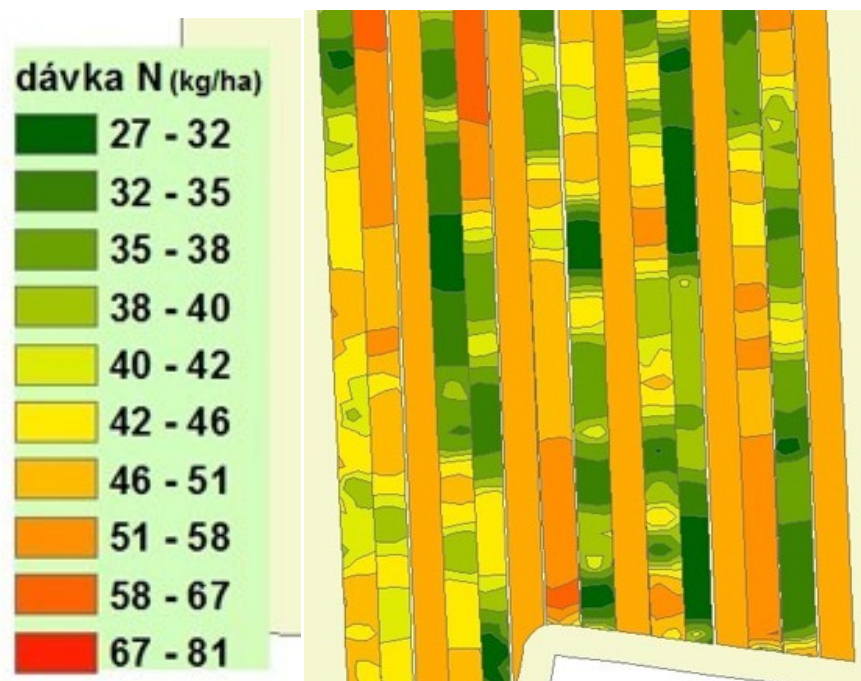
Všechny tyto nosiče jsou vybaveny polohovými systémy GNSS či GPS.

Globální družicový polohový systém (GNSS) je systém určující polohu pomocí satelitů umístěných na oběžné dráze a to zpravidla s přesností na několik stovek až desítek metrů.

Globální (GPS) vychází z GNSS. Jedná se o vojenský polohový systém, který řídí ministerstvo obrany Spojených států amerických. Jeho část je volně dostupná veřejnosti a je o něco přesnější než GNSS.

Oba tyto systémy pracují společně a zvyšují přesnost určení polohy. Hlavním rozdílem je, že zatímco GNSS přijímače jsou kompatibilní s GPS, GPS přijímače nejsou kompatibilní s GNSS ("GNSS / GPS Technology Differences | TerrisGPS," 2017).

Další prvky používané v precizním zemědělství jsou senzory měřící spektrální vlastnosti povrchu. Nedílnou součástí jsou pak systémy na vyhodnocování získaných dat a na tvorbu aplikačních map, tzv. geografické informační systémy (GIS).



Obrázek 9 Ukázka aplikační mapy pro rozdílnou potřebu přihnojení dusíkem (Krček, 2017)

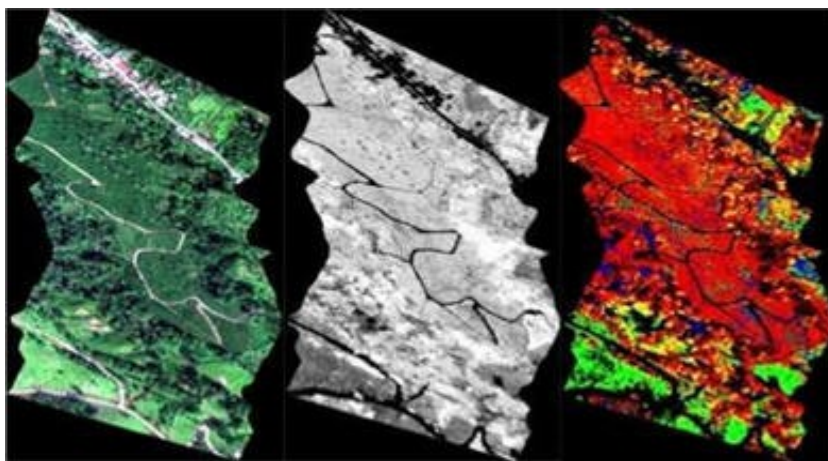
3.3.2.1 Údaje sbírané pro tvorbu aplikačních map

Aplikační mapy mohou být různého charakteru. Může se jednat o mapy určené k aplikaci hnojiv, pesticidů, zavlažování, nebo mapy určené pro postupné sklizení. Nejpoužívanějším způsobem je multispektrální a termální snímkování, na jehož základě se pomocí GIS vypočítávají vegetační indexy, zaplevelení, či zastoupení vody v půdě.

Všechna data zmíněných parametrů lze získávat pomocí dálkového průzkumu země, tzn. pomocí letadel či UAV, přičemž použití UAV je jednoznačně výhodnější z důvodu přesnosti, nižších nákladů i snadnějšího (možno i autonomního) ovládání.

Multispektrální, hyperspektrální a termální snímkování

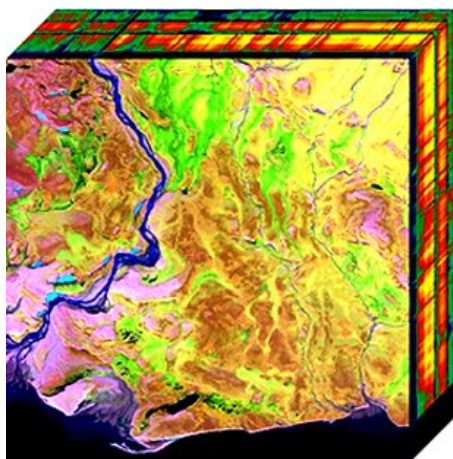
Multispektrálním snímkováním je myšleno snímkování v mnoha barevných spektrech. Když snímkuje ve viditelném spektru a tato spektra spojíme pomocí RGB syntézy dohromady, vznikne nám barevný obraz blízký tomu, jak ho reálně vnímáme okem. Když jsou data z každého pásma promítnuta pouze jednotlivě, vznikne nám černobílý obraz, respektive obraz v různých stupních šedi. Pokud pak snímkuje v jiném spektru než ve viditelném (VIS), vznikne nám obraz v tzv. nepravých barvách. Nejčastěji se používá blízké infračervené spektrum (NIR), které je nejvhodnější pro mapování vegetačního pokryvu (Barrett & Curtis, 1999), (Cracknell, 2007). Na obr. 10 můžeme vidět ukázkou jednotlivého multispektrálního snímání.



Obrázek 10 Ukázka multispektrálního snímání (zleva: RGB, monochromatické, IR)
(Homeland Surveillance and Electronics, 2015)

Na základě tohoto snímání lze odvodit i výšku plodin a z té odhadnout množství biomasy (Juliane Bendig et al., 2014).

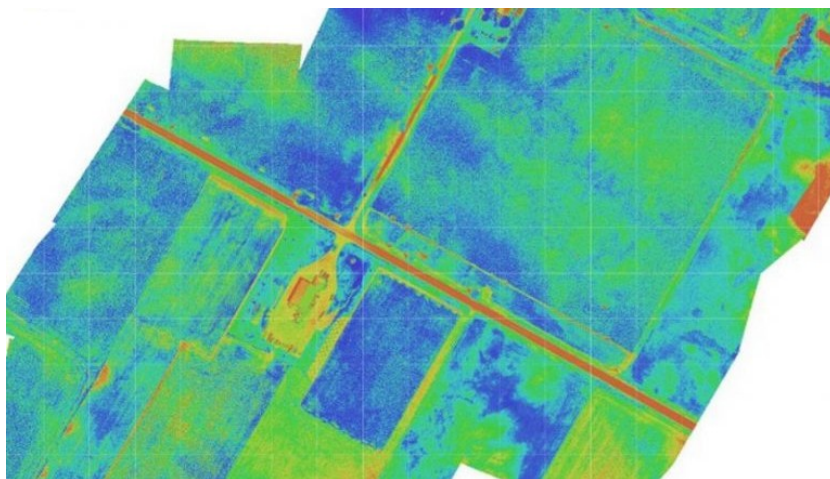
Hyperspektrální snímání pořizuje snímky v několika desítkách až stovkách úzce vymezených spektrálních intervalů a zaměřuje se především na drobné charakteristiky zemského povrchu (Sun, 2010), (Kaplan, 2007). Pro představu je na obr. 11 znázorněna část území snímaného hyperspektrálně. Jak je vidět, jsou zde patrné mnohem větší detaily než v multispektrálním snímání.



Obrázek 11 Ukázka hyperspektrálního snímání (Short, 2017)

Hyperspektrální snímání je velmi často využíváno na předpovídání výnosů plodin, protože výnos plodin reaguje na změny okolních faktorů biotických i abiotických, a to se odráží ve vegetačním pokryvu a projeví se tedy i při hyperspektrálním snímání (Vilém Pechanec, Aleš Vávra, 2014), (Henten, Goense, & Lokhorst, 2009).

Termální snímkování se využívá pro zjištění tepelného záření půdy. Tato charakteristika se mění na základě množství vody obsažené v půdě, protože právě voda výrazně mění vlastnosti povrchů. Termální snímky se tedy běžně využívají na zjištění obsahu vody v půdě, míry evapotranspirace, či určování druhu hornin (Dobrovolný, 2009), (Bellvert, Zarco-Tejada, Girona, & Fereres, 2014), (Williams, 2009).



Obrázek 12 Ukázka termálního snímkování, kde modrá barva značí dostatek vody v půdě a červená značí suchou půdu (Nixon, 2017)

Zaplevelení

Když se v poli vyskytnou nežádoucí druhy rostlin, jedná se o zaplevelení. V precizním zemědělství se proti zaplevelení zasahuje v případě, překročí-li práh škodlivosti, tedy v případě, kdy jeho přítomnost snižuje výnos biomasy. V případě překročení únosné míry se v precizním zemědělství aplikují herbicidy, avšak pouze lokálně v míře nezbytně nutné. Tím se výrazně sníží ekonomické náklady na potřebné herbicidní látky a sníží se ekologický dopad na okolní prostředí (Kubašáková M., Smutný V., Lukas V., 2012), (Dixit, Dixit, Lohan, & Kumar Dinesh, 2014), (Ali, 2013).

Mapování zaplevelených míst lze provádět jak manuálně tak i pomocí senzorů na principu DPZ (Hamouz, 2014), (Hamouz, Soukup, Štípek, Balík, & Černý, 2006).

Spektrální křivky

Spektrální křivky jsou výsledkem vyhodnocení zaznamenaných údajů na základě odrazivosti. Stres nebo chybějící živiny se zpravidla na rostlině projeví např. ve formě žloutnoucích listů nebo jejich opadu a to se následně ukáže právě na změně jejich odrazivosti. Pomocí spektrálních

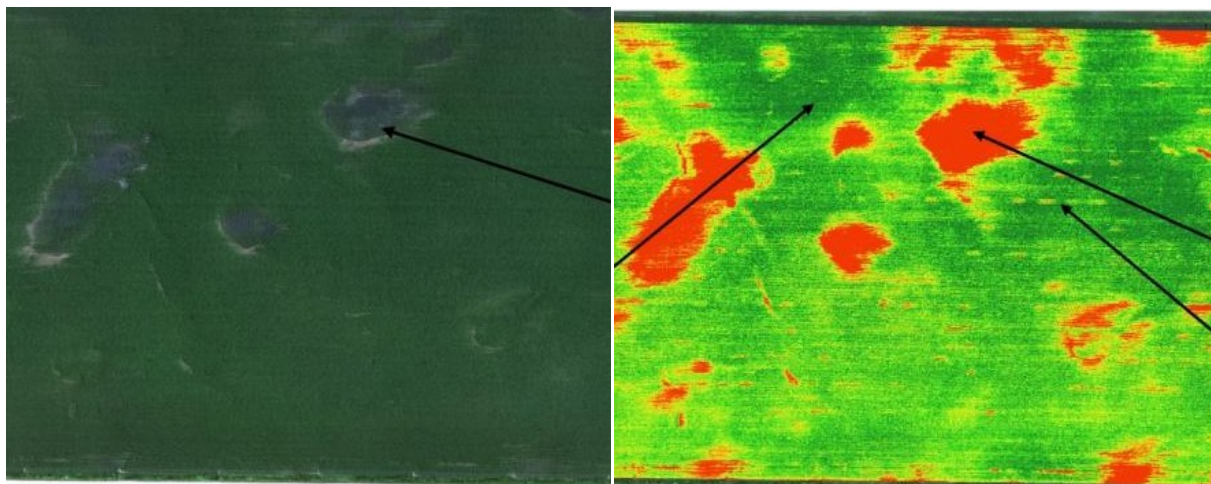
křivek tak lze zjistit úrodnost půdy, zdravotní stav rostlin a tudíž i jejich výtěžnost, popřípadě poškození dané vegetace (Steven, Malthus, Baret, Hui, & Chopping, 2003).

Vegetační indexy

Vegetační indexy jsou v precizním zemědělství hojně využívány. Jedná se o matematické modely popisující odrazivost v přesně definovaných spektrech. Mezi nejzákladnější a nejčastěji vyhodnocované indexy patří tzv. NDVI (normalizovaný diferenční vegetační index) a tzv. DMP (index produkce suché hmoty) (Laudien, Bareth, & Doluschitz, 2004), (Seelan, Laguet, Casady, & Seielstad, 2003). Další využívané indexy jsou např. SR (simple ratio), SAVI (soil adjusted vegetation index), GAI (green area index v m^2/m^2), N_{shoot} (celkové množství dusíku v kg/ha) a mnoho dalších (Müller, Böttcher, Meyer-Schatz, & Kage, 2008), (Steven, 1998), (Juliane Bendig et al., 2014), (Komeščíková, 2006).

NDVI

NDVI (*normalized difference vegetation index*) je jedním z nejdůležitějších vegetačních indexů. Určuje se na základě odrazivosti světla od listů rostlin ve viditelném spektru a v blízkém infračerveném. Slouží ke kontrole jednotlivých rostlin v rámci celé kultury během vegetační sezony. Díky němu lze zaznamenat zhoršení zdravotního stavu i přesto, že pouhým okem ještě není nic patrné (Iotcluster, 2016), (Henten et al., 2009), (Honkavaara et al., 2013).



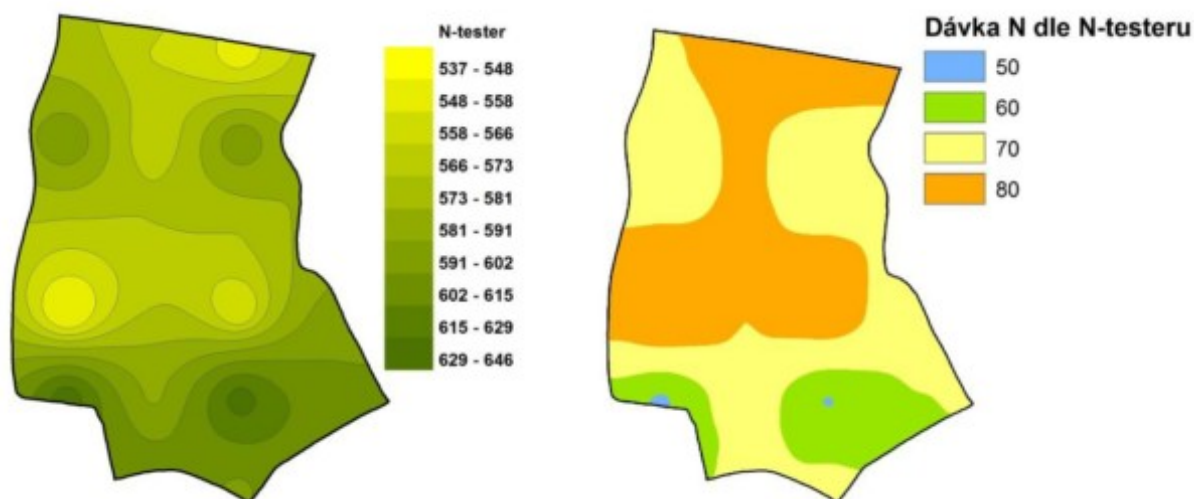
Obrázek 13 Ukázka ortofoto pole pořízené UAV (vlevo) a snímek téhož pole s vypočteným NDVI (vpravo) (VanderLeest, Bergman, Darr, & Murphy, 2016), červené zbarvení zde značí zhoršený zdravotní stav rostlin

LAI

LAI (*leaf area index*) je dalším používaným parametrem pro stav rostlin. Definuje se jako horní plocha listů na jednotku plochy (Chen & Black, 1992). Jedná se o parametr, který se měří za účelem odhadu primární produktivity rostlin. (Liu, Zhou, Wu, Xia, & Tang, 2016) Je také důležitý pro modelování klimatu, protože velikost povrchu listů je úzce spjata s výměnou vodní páry a plynů s atmosférou, která je tak přímo ovlivňována (Gonsamo & Pellikka, 2001), (Gobron, 2000). Je dokázáno, že indexy LAI a NDVI vykazují jistou míru korelace. Při dobře vyvinutém porostu, kdy LAI dosáhne určité hodnoty se NDVI již nemění, to znamená, že rozdíly v porostu pomocí NDVI již nejsme schopni rozeznat (Lukas et al., 2012), (Vojtěch & Neudert, 2016), (Sankaran et al., 2015).

N senzory

N senzory nebo-li N testery jsou zařízení, která měří obsah chlorofylu v listech, který úzce koreluje s celkovým obsahem dusíku. To se děje na základě odlišné transmitance paprsků červeného a infračerveného záření. Zatímco červené záření list absorbuje, infračervené nikoli. Podle výsledků stanovených N testerem při dostatečně hustém proměření celého pole, lze vytvořit interpolací aplikační mapu pro přihnojování dusíkem (Lukas et al., 2012). N testery se umísťují přímo na traktor, kde snímají obsah dusíku v reálném čase (Krček, 2017). V současné době se testuje připevnění N senzorů i na UAV (Nelson, 2015).



Obrázek 14 Ukázka proměření stavu dusíku N testerem (vlevo) návrh aplikační mapy pro přihnojování dusíkem (vpravo) (Lukas et al., 2012)

3.4 Potenciál a výhody využití UAV v precizním zemědělství

Precizní zemědělství je kombinací tradičního hospodaření a moderní techniky. Tato kombinace se rozvíjí od 80. let 20. století velmi rychle, především ve vyspělých zemích. Cílem je využít moderní prostředky ke zjednodušení, ušetření a zdokonalení práce, spojené se zemědělskou výrobou. Plusem navíc je ochrana okolní přírody a krajiny z hlediska přiměřené aplikace hnojiv a pesticidů, díky heterogennímu přístupu ke kultivované ploše.

Zde nalézají uplatnění i bezpilotní letecké prostředky. Když vezmeme v úvahu využití dronů v oblasti životního prostředí, drony využívané v precizním zemědělství zaujímají cca 60 % z celkového využití (Shahbazi, Théau, & Ménard, 2014).

Precizní zemědělství zatím využívají zejména velké zemědělské podniky, nebo větší farmáři v nejvyspělejších státech. Nicméně, je zde obrovský potenciál, jak tento systém dále rozšiřovat, rozvíjet a zlepšovat (Dixit et al., 2014). Masivním rozšířením tohoto způsobu hospodaření, by se mohlo podařit zvýšit produkce plodin a snížit eutrofizace a kontaminace vod, zlepšit hospodářské využívání krajiny a zároveň zachovat nepoškozenou krajinu pro další generace (Naresh, Kumar, Chauhan, & Kumar, 2012). Důležité tedy je, dostat do povědomí lidí, že se jedná o ekonomický a zároveň o vysoce ekologický způsob hospodaření.

Jednou z technologií využívaných v precizním zemědělství jsou i bezpilotní letecké prostředky. Tyto prostředky hrají klíčovou roli při monitorování plodin a často nahrazují pilotovaná letadla z důvodu nižších ekonomických nákladů na jejich pořízení a provoz a také z důvodu vyšší přesnosti získaných dat, díky nižší letové hladině. Jejich provoz je ekologičtější a existuje i možnost jejich provozu v autonomním režimu.

UAV se v precizním zemědělství využívají zejména na snímkování polí v multispektrálním a infračerveném pásmu. V tomto případě mohou zcela nahradit pilotovaná letadla či družice. Navíc UAV jsou šetrnější k životnímu prostředí z hlediska nežádoucích emisí. Další výhodou takového monitoringu oproti měření pomocí senzorů připevněných na traktorech či jiné pozemní technice, je rychlost a množství získaných dat, bez zbytečného poškození plodin, utužení půdy nebo způsobení eroze. To jsou také další důvody, proč mají UAV tak velký potenciál. Lze je také využít na přesné hnojení či postřik pesticidy (Stevenson, 2014), k monitorování vodního režimu půdy, zjišťování zdravotního stavu rostlin, mapování výnosů, posuzování dopadu hnojení na růst plodin aj. (Khanal, Fulton, & Shearer, 2017a), (Zhang & Kovacs, 2012).

Použití UAV v precizním zemědělství rychle roste a očekává se, že v průběhu několika let se využití bezpilotních prostředků minimálně zdvojnásobí (Zhang a Kovacs 2012).

Precizní zemědělství používá všechny typy konstrukcí bezpilotních systémů, protože každý má své přednosti a jedinečnou kombinaci lze docílit optimálního výsledku. Nicméně nejuniverzálnějším, nejvíce vylepšovaným a nejrychleji se rozvíjejícím systémem jsou multikoptéry.

Dnes je již část používané techniky zcela autonomní a ovládání je tedy velmi snadné.

V precizním zemědělství se používají nejrůznější senzory pro sběr dat, které jsou zpracovávány v GIS systémech a jejich výstupy jsou dále využívány pro další rozvoj a péči o zemědělskou půdu. Navíc výstupy mohou být použity pro dlouhodobý monitoring úspěšnosti daných operací a případné zlepšování techniky ve směru, ve kterém zaostává.

Jako hlavní výhodu, kterou je potřeba u dronů zmínit, jsou ekonomické náklady. Cena profesionálního dronu je zlomkem ceny pilotovaného letadla. Navíc finanční náklady na provoz UAV jsou mnohem nižší, než náklady spojené s provozem pilotovaného letadla. Dalším aspektem je snadná manipulace a mobilita stroje. Není zde potřeba zkušeného pilota, ovládat dron dokáže po krátkém tréninku skoro každý. Možnost připojení různých speciálních senzorů činí z dronu neobyčejně flexibilní zdroj dat. Díky možnosti přenosu obrazu v reálném čase, lze urychlit a zefektivnit práci na maximum. Další podstatnou výhodou UAV oproti pilotovaným letadlům je vzhledem k výšce jejich letu přesnost mapování či možnost lokální aplikace hnojiv a pesticidů. Nevýhodou je menší kapacita nádrží z důvodu omezené nosnosti a kratší dolet. Dalším aspektem je relativně tichý chod stroje, což opět přispívá k ekologičtějším přístupům, protože tolik neruší zvěř (Urbahs, Petrovs, Savkovs, Jakovlevs, & Bulanovs, 2008), (Rango et al., 2006), (Rasmussen, Nielsen, Garcia-Ruiz, Christensen, & Streibig, 2013).

UAV nejde zcela objektivně srovnávat s družicemi, neboť družice jsou primárně systémy vyvinuté k jiným účelům, než je zemědělské mapování. Nicméně, když přece jen srovnáme použití družic a UAV k mapování, dojdeme k závěru, že družice jsou sice schopny zmapovat násobně větší plochu, ale poskytují data nižšího rozlišení než drony a dále je zde výrazná závislost na klimatických podmínkách, konkrétně na oblačnosti. Po finanční stránce jsou UAV opět dostupnější nejen z hlediska počátečních nákladů ale i provozu (Rokhmana, 2015), (Paper & Michas, 2015).



Obrázek 15 Porovnání rozlišení snímků pořízeného družicí a UAV (Rokhmana, 2015)

Precizní zemědělství vzbuzuje zájem, na základě kterého jsou často kladeny otázky jako: Vyplatí se nám to? Jaké výhody nám to přinese? Vráti se nám vložené investice? Kdo dokáže ovládat tuto techniku? Při jaké rozloze farmy se to vyplatí? Jaké dopady to má na zemědělskou produkci? Na všechny tyto otázky, a na mnoho dalších, bylo mimo jiné odpovídáno i na konferenci precizního zemědělství konané v Praze 7. 3. 2017 Centrem pro precizní zemědělství. Precizní zemědělství má mnoho výhod a může ušetřit mnoho času a nákladů, ale hlavně je šetrné k životnímu prostředí. Techniky precizního zemědělství se vyplatí i pro menší zemědělce, protože některé nedostatky jsou pouhým okem nepozorovatelné, po změření např. NDVI lze jasně definovat, kde se nachází slabé místo, popřípadě čím je způsobeno. Dopady na zemědělskou produkci jsou jen pozitivní, protože se k danému území přistupuje zcela individuálně, živiny jsou doplňovány pouze v nezbytné míře přesně tam, kde jsou potřeba. Nedochází tedy k nadužívání hnojiv a pesticidů. Tím se snižují náklady a zároveň se snižují pojezdy těžké techniky na poli, což opět vede nejen k ušetření nákladů na pohonné hmoty ale i ke snížení utužení půdy, které negativně ovlivňuje krajinu. Precizní zemědělství se řídí principem udržitelného rozvoje, který je v dnešní době jedním z nejdůležitějších celosvětově uznávaných principů.

Studium a výroba nových a účinnějších systémů pro použití v precizním zemědělství je samozřejmostí, která je v dnešní době na denním pořádku. Naopak zlepšení by bylo zapotřebí v propagaci a rozšíření precizního zemědělství.

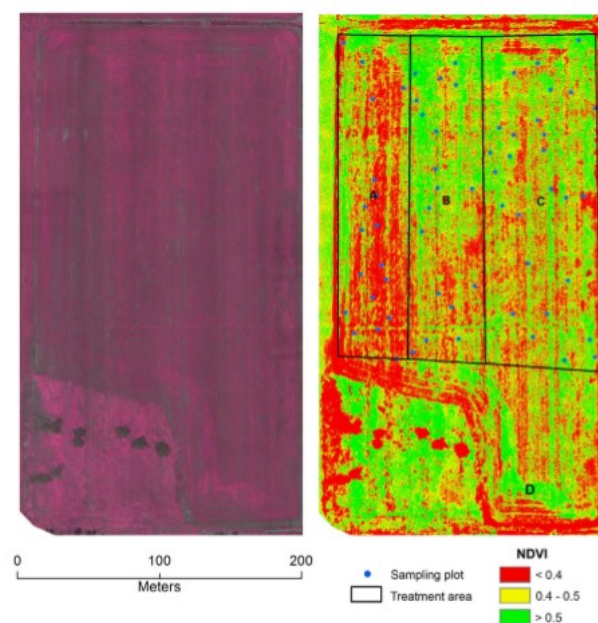
4 Případové studie použití dronů v praxi

4.1 Využití UAV pro potřeby monitoringu

Studie s názvem „*Applications of Low Altitude Remote Sensing in Agriculture upon Farmers' Requests– A Case Study in Northeastern Ontario, Canada*“ (Zhang et al., 2014) se zabývá použitím bezpilotních leteckých prostředků k získávání dat pro potřeby farmářů v Kanadě, konkrétně jde o zjišťování účinnosti hnojiv (organická hnojiva, chemická hnojiva, či jejich kombinace), identifikace oblastí napadených škůdci, určení vhodných drenážních systémů a také porovnává možnosti operačního nasazení UAV s družicemi v případě zhoršených meteorologických podmínek.

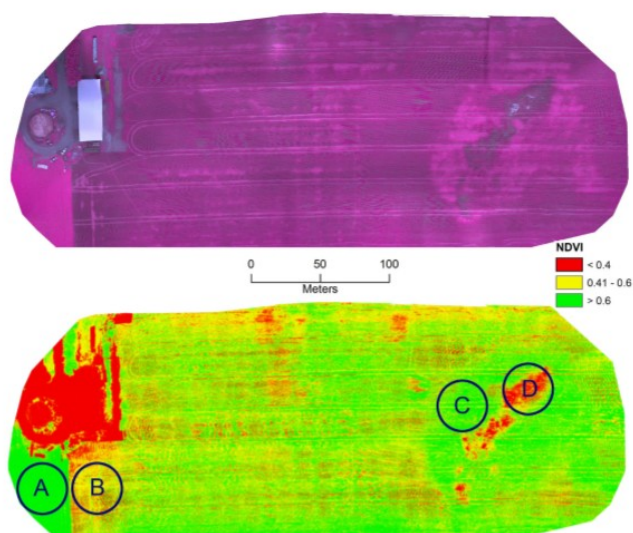
Pro měření byl použit bezpilotní letecký prostředek vyrobený společností Aeryon Labs Inc tzv. Aeryon Scout. Jedná se o kvadrokoptéru vybavenou optickou i infračervenou kamerou, dosahující maximální rychlosti 50 km/h, a doletu až 3 km od hlavní řídicí stanice s výdrží cca 25 minut letu. Stroj při snímkování přiřadil ke každé fotografii GPS údaje. Prostorové rozlišení získaných dat bylo 3,5 až 5 cm, při sběru dat ve výšce 120 m. Ze získaných jednotlivých fotografií se pak pomocí počítačového programu Pix4d Mapper vytvořila mozaika, která dále posloužila jako výstupní mapa pro určení dalšího specifického zásahu, který (podle Zhang, Walters, & Kovacs, 2014) by měl následovat hned po dokončení zpracování dat, nejdéle však do dvou dnů od jejich pořízení. Pro co nejrychlejší zpracování dat je zde doporučováno, aby bylo zajištěno jako služba od specializované firmy.

Po porovnání infračervených snímků a vypočteného NDVI bylo zjištěno, že úsek ošetřený pouze organickým hnojivem byl v infračerveném spektru nejtmavší a vypočtené NDVI měl nejnížší, naopak tomu bylo v úseku, kde bylo použito pouze chemické hnojivo. Nicméně rozdíly mezi použitím pouze organického či směsi organického a chemického hnojiva, nebo použití pouze chemického či směsi chemického a organického hnojiva, nebyly zaznamenány jako statisticky signifikantní. Z toho lze vyvodit, že použití hnojiv je nejvýhodnější kombinovat jak z ekonomických, tak i ekologických důvodů.



Obrázek 16 Ukázka snímku pole v pásmu NIR (vlevo) a vypočtené NDVI (vpravo) (Zhang et al., 2014)

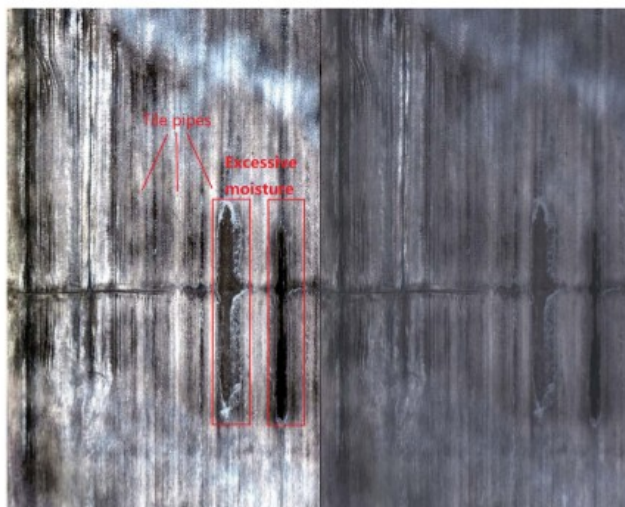
Dalším výstupem této studie byla identifikace míst výskytu škůdců. Pro tento účel bylo opět využito infračervených snímků, kde zamořené oblasti z důvodu zvýšeného okusu vykazovali nižší odrazivost, tedy světlejší zbarvení a pro názornější zobrazení i odvozené NDVI, kde jasně zelené zbarvení ukazuje zdravé oblasti a červené zbarvení oblasti napadené.



Obrázek 17 Ukázka snímku pole v pásmu NIR (nahore) a vypočtené NDVI (dole) (Zhang et al., 2014)

Pro zjištění správného drenážního systému byla vytvořena mozaiková mapa odrazivosti plochy z monochromatických snímků pořízených pomocí UAV v mimovegetační době. Na snímcích je

pak jasně vidět, které oblasti jsou dobře vysušené, ty jsou zobrazeny světle, a naopak oblasti příliš vlhké jsou zobrazeny tmavě.



Obrázek 18 Ukázka monochromatického snímku pole (Zhang et al., 2014)

Co se týká zhodnocení UAV pro potřeby precizního zemědělství, studie svými výsledky dokazuje, že bezpilotní letecké prostředky mohou nahradit družicové snímky, které jsou často nepoužitelné z důvodu vysoké oblačnosti. Obecně mají UAV mnohem větší flexibilitu než pilotovaná letadla a satelity. Avšak je zde zdůrazněno, že by měl být brán ohled na intenzitu slunečního záření, a to zejména při tvorbě rozsáhlejších mozaik, skládajících se ze stovek snímků.

Všechna zpracovaná data byla poskytnuta zúčastněným farmářům, kteří na výsledky reagovali příslušným hospodářským zásahem. V případě zjišťování správné drenáže, která byla pouhým okem nezjistitelná, se jednalo o urychlenou nápravu.

4.2 Využití UAV pro mapování zaplevelení

Studie „*Weed Mapping in Early-Season Maize Fields Using Object-Based Analysis of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Images*“ (Peña, Torres-Sánchez, de Castro, Kelly, & López-Granados, 2013) se věnuje mapování plevelů v kukuřičném poli ve Španělsku, pomocí bezpilotních leteckých prostředků a k jejich cílené destrukci. Studie je zajímavá jak z ekonomických, tak z ekologických důvodů. Díky znalosti, kde dochází k výskytu plevelu, lze radikálně snížit náklady na použité herbicidy, a snížit přísun chemických látek do půdy.

Mapování plevelů není v zemědělství novinkou. Probíhalo pomocí pilotovaných letadel nebo satelitů mnohem dříve, než se objevily drony, ale z důvodu jejich letové výšky a rozlišovacím

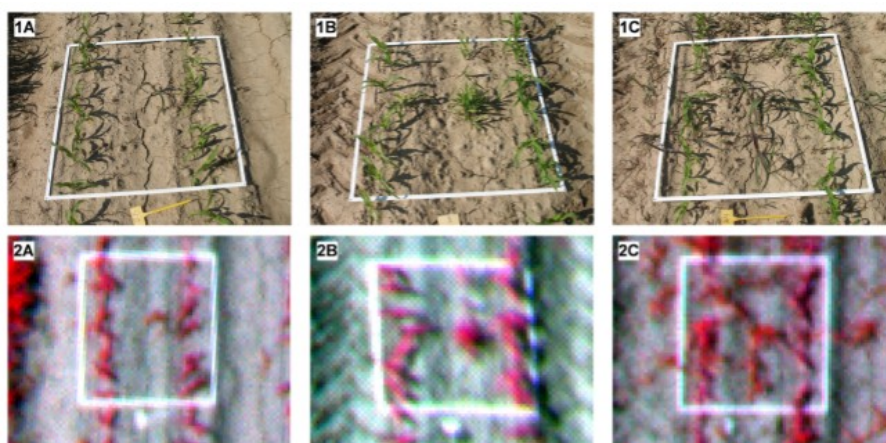
schopnostem, tento monitoring zpravidla probíhal v pozdních růstových stádiích, kdy je zbavení se plevelů výrazně náročnější. Optimální doba pro ošetření herbicidy je počátkem růstové sezóny, kdy satelity ještě nebyly schopny rozlišit plevel od pěstované kultury. UAV toto dokáží mnohem dříve, již v raných fázích, a proto stačí i menší množství herbicidů na jejich odstranění.

Pro tento účel byla vyvinuta procedura založená na zcela automatickém objektovém obrazovém rozboru tzv. OBIA (object-based image analysis), která využívá šestipásmovou spektrální kameru pro sestavení konečné mapy zaplevelení. Metoda OBIA se skládá ze tří fází a to:

- 1) automatického vymezení řádků plodiny
- 2) odlišení plodiny a plevelů na základě jejich vzájemné polohy
- 3) vytvoření mapy plevelného zamoření.

Použitým bezpilotním leteckým prostředkem zde byla opět kvadrokoptéra od německé firmy Microdrones GmbH, Siegen, vybavená multispektrálním senzorem se šesti kanály a fotoaparátem s konfigurovatelnými filtry. Letová výška pro tento účel byla 30 m nad zemí, snímky byly pořízeny s přesností 2 cm.

Samotné mapování ztěžovala podobnost spektrálních vlastností plodin a plevelů i jejich fyzická podobnost. Nicméně přesnost získaných dat byla uspokojivá a to celých 82 %.



Obrázek 19 Ukázka zaplevelení a) nízké zaplevelení, b) střední, c) vysoké - fotografie pořízené ze země (nahore) a pomocí UAV (dole) (Peña, Torres-Sánchez, de Castro, Kelly, & López-Granados, 2013)

4.3 Využití UAV pro fenotypizaci pole

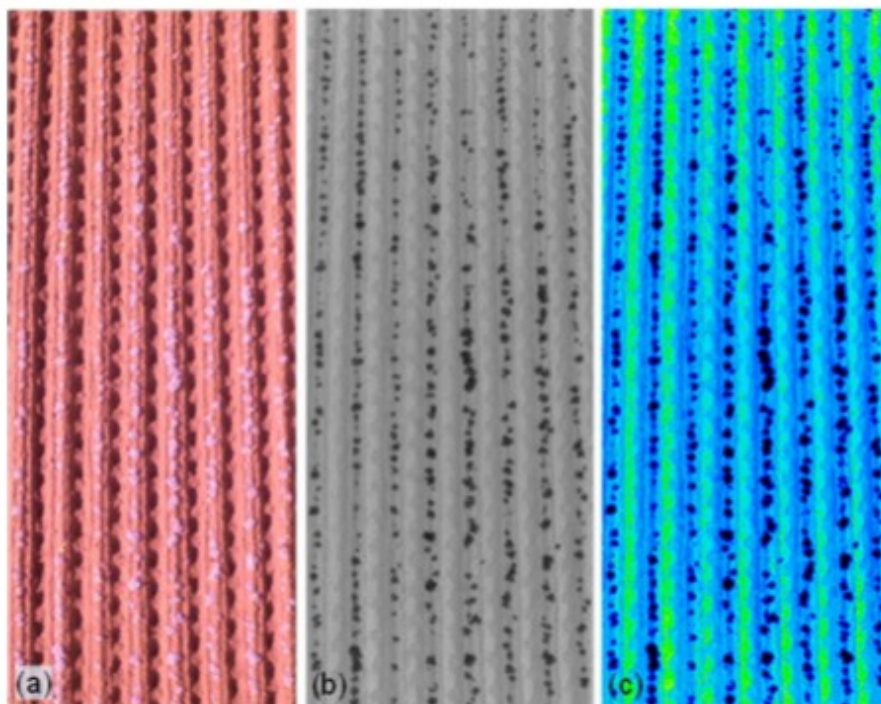
Další studie je zajímavá především tím, že dává do souvislosti s UAV a precizním zemědělstvím další obor, a to genetickou modifikaci rostlin. Studie se nazývá „*Low-altitude, high-resolution aerial imaging systems for row and field crop phenotyping: A review*“ (Sankaran et al., 2015)

poskytuje informace o fenotypizaci pole za účelem maximálního zlepšení podmínek pro kultivaci plodin. Fenotypizace je klíčovou složkou pro zlepšení plodin prostřednictvím genetiky. Rostlinná genetika se snaží vytvořit druhy co nejvíce stresově odolné, rezistentní vůči nemocem a škůdcům, ale nelze vytvořit univerzálně odolný druh, který by byl vhodný pro všechny lokality. Proto je nutné sbírat informace o daném poli a ze získaných reakcí rostlin na konkrétní okolnosti, pak lze cílenou genetickou modifikací přizpůsobit plodiny místním podmínkám.

Pro fenotypizaci pole byly vybrány bezpilotní letecké prostředky z důvodu jejich flexibility, protože zatím neexistuje pozemní platforma natolik univerzální, aby byla schopna sbírat příslušná data z členitých oblastí v krátkém čase a zároveň nepoškozovala zemědělskou půdu jejím utužováním.

Práce stručně shrnuje rozdělení bezpilotních leteckých prostředků a jejich platforem vhodných pro různé použití, např. tepelné kamery, hyperspektrální kamery nebo multispektrální kamery, které se používají pro měření růstu a vývoje plodin, sledování jejich vitality, reakce, deficitu živin, tepelného stresu, detekci plevelů, kontrolu vodního režimu atd. Dále studie podrobněji rozebírá parametry růstu rostlin a jejich souvislosti jako jsou NDVI, GNDVI a LAI. Nespornou výhodou UAV je možnost jejich opakovaného použití v různém období pro dlouhodobý monitoring.

Jedna z klíčových vlastností, která může být vyhodnocena právě pomocí UAV je růst rostlin, popřípadě jejich zralost. Pro ukázkou je zde uveden příklad brambor, kde snímkování proběhlo 37 dní po jejich sadbě. Snímky byli pořízeny pomocí UAV z výšky 15 m nad zemským povrchem a následně zpracovány.

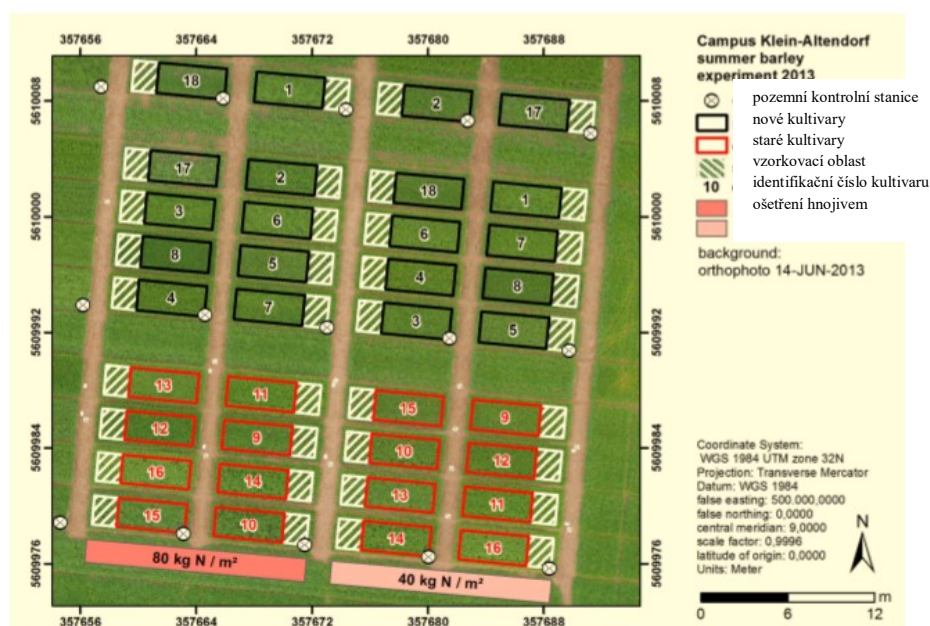


Obrázek 20 Ukázka růstu brambor 37 dní po sadbě a) v nepravých barvách (R, G, NIR jako RGB pásma, b) NDVI v čenobílém odstínu, c) zvýrazněné barvy pro lepší vizualizaci (Sankaran et al., 2015)

4.4 Využití UAV pro odhad biomasy

Práce s názvem „*Estimating Biomass of Barley Using Crop Surface Models (CSMs) Derived from UAV-Based RGB Imaging*“ (Juliane Bendig et al., 2014) se věnuje odhadování biomasy pomocí snímků z UAV tzv. metodou CSMs, tzn. na základě výšky rostlin. Odhad biomasy hraje klíčovou roli pro predikci výnosu a slouží i jako podklad pro určení množství potřebného dusíku (hnojiva) pro maximalizaci výnosu.

Biomasu lze odhadovat více způsoby, nejčastěji se používá měření pomocí laserového skenování, nebo tzv. 3D geometrické informace získávané pomocí UAV. V této studii byly údaje pro odhad biomasy pořízeny UAV na experimentálním poli ječmene v Německu nedaleko Kolína nad Rýnem a byly porovnávány s údaji získanými z pozemních kontrolních stanic rozmístěných rovnoměrně po celé ploše. Pozemky byly dále rozděleny na nové a starší, kde polovina byla přihnojována 80 kg N na ha a polovina pouze 40 kg N / ha.

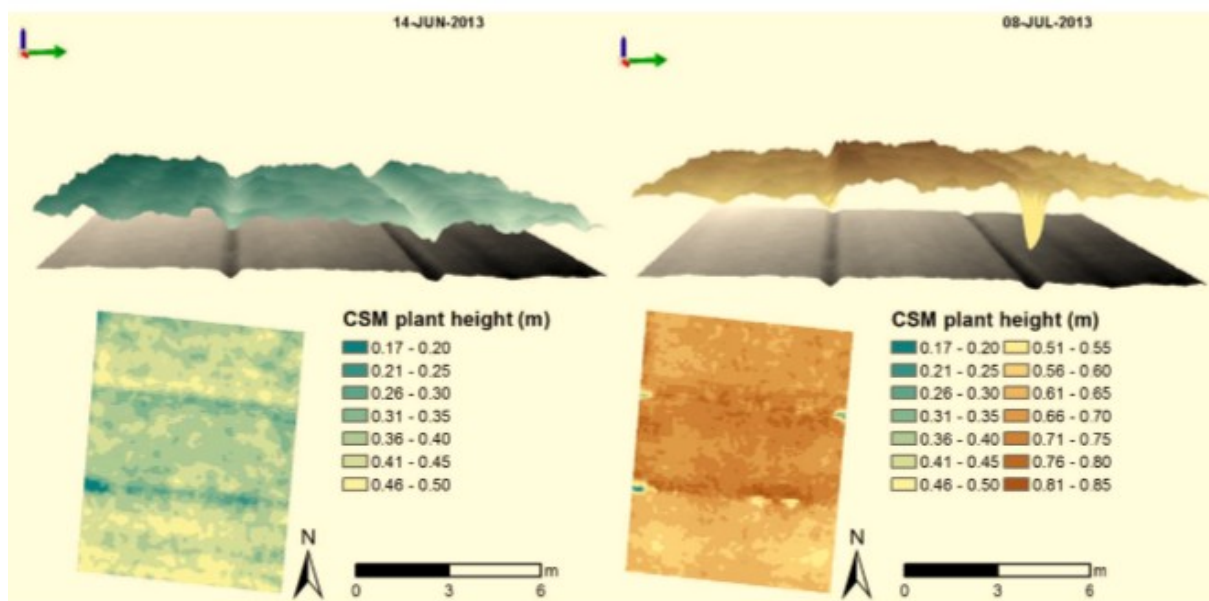


Obrázek 21 Ukázka členění experimentální plochy (Juliane Bendig et al., 2014)

Ze vzorkovacích oblastí byly odebírány vzorky buď ve stejný den nebo den před/po letu UAV a tyto oblasti byly vyloučeny z dalších výpočtů. Odebraná biomasa byla očištěna, zbavena podzemních částí rostlin a následně zvážena a zapsána jako hodnota čerstvé biomasy, po vysušení byla opět zvážena a zapsána jako hodnota suché biomasy.

Pro měření ze vzduchu bylo použito bezpilotního leteckého prostředku, konkrétně MK-oktokoptéry, rakouské společnosti HiSystems. Maximální doba letu byla zhruba 15 minut, sběr dat probíhal z výšky 50 m nad zemí a snímky byly pořizovány v pravidelných 500 ms intervalech.

Výsledkem bylo sestavení mozaikového obrazu pro vytvoření digitálního modelu povrchu (digital surface model- DSM), respektive povrchového modelu plodiny (crop surface model - CSM).



Obrázek 22 Ukázka zpracovaných dat - digitální model terénu, odvozená výška porostu
(Juliane Bendig et al., 2014)

Dále následovalo další zpracování dat, a to ve statistických programech za účelem odhadu biomasy pomocí regresních funkcí a korelační analýzy. Výsledky odhadu a měření pak byly podrobně porovnávány.

Odhad výšky rostlin vycházející z CSM se porovnával s referenčním měřením na zemi. Bylo zjištěno, že odhad byl o 0,1 m nižší než referenční hodnoty protože CSM zachycuje celé sledované území a nikoli pouze nejvyšší body, přesto R zde dosahuje velmi vysokých hodnot a to až 0,92. Práce v závěru poukazuje na možné zkreslení naměřených hodnot způsobené např. vlivem větru. Relativně vysoká přesnost měření byla zjištěna i u dalších údajů, a to jak při odhadu čerstvé, tak i suché biomasy, kdy hodnoty R dosahovaly kolem 0,76 - 0,82.

Výsledkem této práce je zjištění, že ačkoli výsledky pořízené pomocí UAV nemusí být tak přesné, jako údaje získané sběrem dat na zemi, jsou získány násobně rychleji, s menší námahou, z mnohem větší oblasti, s dostatečnou přesností, a proto je použití UAV pro odhad biomasy vypočtené z výšky rostlin vhodnou volbou, zejména pro rozsáhlejší, či členitější území.

4.5 Zhodnocení případových studií

Případových studií na téma použití bezpilotních leteckých prostředků v precizním zemědělství je mnoho z různých míst po celém světě a zabývají se různými aspekty - např. (Hassanalian & Abdelkefi, 2017) se zaměřuje na hodnocení dronů podle parametrů, možností a výhod jejich použití, dále je zde diskutováno řešení pro další generaci UAV, stejně tak je tomu i v práci (Zhang & Kovacs, 2012). (Paper & Michas, 2015), kde hodnotí přesnost UAV a softwarů

vytvořených pro potřeby precizního zemědělství v porovnání s daty získanými pomocí družic, konkrétně pak třeba Landsat-8. (Gago et al., 2015) zkoumá různé vegetační indexy a jejich souvislost s vodním stresem. I další studie se zabývají obdobnými tématy např. (J. Bendig et al., 2013) vytváří modely povrchu plodin v různých fenologických stádiích a porovnává jejich variabilitu v závislosti na kultivaru a zemědělském ošetření. Získaná data pak jsou kvantitativně zpracovávána pomocí aplikace Esri ArcGIS. Podobně tomu je i u (Rokhmana, 2015), který se zabývá měřením digitálního modelu terénu, výškou a hustotou rostlin, to vše za použití nízkonákladových dronů. Studie (Xiongkui, Bonds, Herbst, & Langenakens, 2017) se zaměřuje na použití UAV pro aplikaci pesticidů. Hodnotí výhody, nevýhody, současný stav i možný budoucí vývoj této technologie. Studie (Khanal, Fulton, & Shearer, 2017b), (Costa, Grant, & Chaves, 2013) se zaměřují na využití termálního snímkování, jednak ke sledování přítomné vody v rostlinách, ke sledování dostatku živin, množství dusíku, tak i k mapování samotné půdy, plánování závlah, identifikace chorob plodin atd. Obdobné studie lze nalézt i v České republice (Vilém Pechanec, Aleš Vávra, 2014), kde UAV nasadili pro mapování ploch s cukrovou řepou.

Všechny tyto studie jsou něčím zajímavé a zasloužily by si mnohem větší prostor, než jen základní informace zmíněné v této práci. Nicméně z výše uvedených studií jednoznačně vyplývá, že UAV mají velký potenciál v precizním zemědělství. Nejen že drony mohou nahradit časově a fyzicky náročná pozemní měření, ale i nákladná letecká měření. Jejich možnosti a uplatnění se budou stále rozšiřovat, úměrně rozvoji techniky a fantazii vývojářů.

4.6 Zpracování získaných dat

Zpracování dat pořízených pomocí dronů je nedílnou součástí každé případové studie. Rychlost získání dat je jedna věc, rychlost zpracování pak druhá. V dnešní době existuje řada programů, které jsou neocenitelnými pomocníky při zpracování takto získaných dat.

Jedním z nejznámějších je platforma ArcGIS od firmy Esri. ArcGIS je geografický informační systém určený pro práci s prostorovými daty, která dokáže vytvářet, zpracovat, analyzovat a vizualizovat jako mapy, interaktivní aplikace či reporty. Je poskytován v různých verzích (ArcGIS Online, ArcGIS Desktop, ArcGIS Pro aj.), s řadou nadstaveb pro usnadnění práce v konkrétních oblastech a s aplikacemi umožňujícími efektivně začlenit do systému i data získaná snímkováním z dronů. Takovou je například aplikace Drone2Map, která dokáže ve velmi krátkém čase takto získaná data zpracovat do ortomozaiky a 3D data zpřístupnit pro analytické nástroje platformy ArcGIS ("doc.arcgis.com," 2017).

Další software pro zpracování dat, který lze využít je ENVI od americké společnosti Exelis Visual Information Solution, jako dceřiné společnosti Harris. ENVI obsahuje kompletní sadu nástrojů pro zpracování, zobrazení a analýzu dat DPZ. Je speciálně navrženo pro práci s družicovými snímky, ale může pracovat i s .vektorovými daty nebo geodatabází (“arcdata.cz,” 2017). Výrobce spolupracuje s firmou ESRI a výsledkem spolupráce je sada nástrojů umožňující využití zpracování dat v ArcGIS.

Podobných softwarů pro zpracování, analýzu a monitoring dat pořízených nejen pomocí UAV je mnoho a každý má své výhody, nevýhody a zaměření, nicméně zpracování dat je velká kapitola sama o sobě a tato práce se tímto tématem podrobně nezabývá, pouze je zmiňuje jako nedílnou součást.

5 Diskuse a závěr

Cílem této bakalářské práce bylo ukázat možnosti a výhody bezpilotních leteckých prostředků používaných v precizní zemědělství za účelem maximalizace výnosů s minimálními náklady a dopady na životní prostředí. Proč jsou UAV v precizním zemědělství výhodné, jaké parametry lze pomocí UAV získat a jaké jsou výhody oproti jiným možnostem sběru dat.

Nosnou myšlenkou precizního zemědělství je zasáhnout včas na daném místě a pouze v míře nezbytně nutné, k dosažení co nejlepšího výsledku. Pro tyto účely jsou využívána veškerá dostupná technická zařízení. Mezi ně patří i bezpilotní letecké prostředky. Využití UAV v precizním zemědělství je zcela běžné a spolu s ostatními systémy tvoří širokou škálu dostupné techniky pro získávání informací o půdě a jejím vegetačním pokryvu. Drony nemohou zcela nahradit všechny senzory či satelity, ale mohou výrazně přispět k zefektivnění práce a jejímu zpřesnění a nahradit či doplnit pilotovaná letadla, používaná pro sběr dat.

Nevýhodou dronů je zatím relativně krátký dolet ve srovnání s pilotovanými letadly, nicméně ekonomické náklady jsou mnohonásobně nižší, jejich řízení je jednoduché, není potřeba vyškoleného pilota, dopad na životní prostředí je minimální díky tomu, že nevypouštějí žádné emise. Emise vypouštěné při jejich výrobě jsou zanedbatelné ve srovnání s emisemi, vypouštěnými při výrobě pilotovaných letadel. Přesnost je z hlediska letové výšky vyšší než u pilotovaných letadel, to se týká nejen dat získaných během mapování, ale i při aplikaci hnojiv a pesticidů. Přesnost UAV ve srovnání se satelity je zřejmá, nevýhodou družic je jejich ovlivnitelnost oblačností, o ekonomických nákladech nemluvě.

Díky rychlému technologickému pokroku se moderní technika využívána v precizním zemědělství stává stále dostupnější pro všechny, a tím se zvyšuje možnost lepšího hospodaření, zvyšuje se kvalita a výnosy jednotlivých plodin a snižují se negativní dopady na životní prostředí. Zemědělství je jednou z největších továren produkujících nežádoucí emise, které způsobují globální oteplování, eutrofizaci vod kvůli splachům přebytečných hnojiv z polí, kontaminaci vod splachy různých pesticidů atd. Precizní zemědělství je klíčem k efektivní regulaci těchto globálních problémů.

Klíčovou roli v precizním zemědělství hrají aplikační mapy vytvořené na základě dat získaných ze vzduchu, jedná se o nejrychlejší nedestruktivní metodu. I použití jen jedné z dostupných technologií, může výrazně ovlivnit celkový stav nejen pěstovaných plodin, ale i jejich širokého okolí.

Na základě prostudované literatury jsem dospěla k závěru, že UAV jsou nejflexibilnějšími, nejekonomičtějšími a nejekologičtějšími sběrači dat pro použití v precizním zemědělství.

Pokud se precizní zemědělství v čele s použitím bezpilotních leteckých prostředků masivně rozšíří, dojde ke zlepšení využívání krajiny, snížení její ekologické zátěže a tím ke zlepšení ekosystému jako celku.

6 Bibliografie

- Ali, J. (2013). Role of precision farming in sustainable development of hill agriculture. In *National Seminar on Technological Interventions for Sustainable Hill Development*. Pantnagar, India.
- Barrett, E. C., & Curtis, L. F. (1999). *Introduction to Environmental Remote Sensing* (4th ed.). New York: Routledge.
- Bellvert, J., Zarco-Tejada, P. J., Girona, J., & Fereres, E. (2014). Mapping crop water stress index in a “Pinot-noir” vineyard: comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle. *Precision Agriculture*, 15(4), 361–376.
- Bendig, J., Bolten, A., Bennertz, S., Broscheit, J., Eichfuss, S., & Bareth, G. (2014). Estimating biomass of barley using crop surface models (CSMs) derived from UAV-based RGB imaging. *Remote Sensing*, 6(11), 10395–10412.
- Bendig, J., Willkomm, M., Tilly, N., Gnyp, M. L., Bennertz, S., Qiang, C., ... Bareth, G. (2013). Very high resolution crop surface models (CSMs) from UAV-based stereo images for rice growth monitoring In Northeast China. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 15(September), 4–6.
- Campbell, B. J. B., & Wynne, R. H. (2011). *Introduction to Remote Sensing* (5th ed.). New York: The Guilford Press.
- Comparetti, A. (2011). Precision Agriculture : Past, Present and Future. In *International scientific conference - Agricultural Engineering and Environment* (Vol. 16). Kaunas, Lithuania.
- Costa, J. M., Grant, O. M., & Chaves, M. M. (2013). Thermography to explore plant–environment interactions. *Journal of Experimental Botany*, 64(13), 3937–3949.
- Cracknell, A. P. (2007). *Introduction to Remote Sensing, Second Edition* (2nd ed.). USA: CRC Press.
- Dixit, J., Dixit, A. K., Lohan, S. K., & Dinesh, K. (2014). *Precision Farming: A New Approach*. (P. S. Editors: Tulasa Ram, Shiv Kumar Lohan, Ranveer Singh, Ed.) (1st ed.). New Delhi: Astral International.
- Dobrovolný, P. (2009). Dálkový průzkum země v termální části spektra. Brno: Masarykova univerzita v Brně.
- Eisenbeiss, H. (2011). The Potential of Unmanned Aerial Vehicles for Mapping. *Photogrammetrische Woche 2011*, 135–145.
- Fisher, M. (2012). CSA News Magazine. *Precision Agriculture in the Developing World*,

(February), 4–9.

- Gago, J., Douthe, C., Coopman, R. E., Gallego, P. P., Ribas-Carbo, M., Flexas, J., ... Medrano, H. (2015). UAVs challenge to assess water stress for sustainable agriculture. *Agricultural Water Management*, 153, 9–19.
- Gemtos, T., Fountas, S., Tagarakis, A., & Liakos, V. (2013). Precision Agriculture Application in Fruit Crops : Experience in Handpicked Fruits. *Procedia Technology*, 8(Haicta), 324–332.
- Gobron, N., & Verstraete, M. M. (2009). Leaf Area Index. In *Global Terrestrial Observing System - Assessment of the status of the development of the standards for the Terrestrial Essential Climate Variables* (Vol. 11, p. 12). Rome.
- Gonsamo A. & P. Pellikka (2008). Defining leaf area index for climate studies (Abstract). In *Interactions Between Land Use and Climate: Multidisciplinary Perspectives from Local Land, Use to Global Climate*. HENVI Science Day, Helsinki, Finland
- Gorban, A. N., Pokidysheva, L. I., Smirnova, E. V., & Tyukina, T. A. (2011). Law of the Minimum Paradoxes. *Bulletin of Mathematical Biology*, 73(9), 2013–2044.
- Hamouz, P. (2014). *Metody regulace zaplevelení pro precizní zemědělství* (1. vyd.). Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze.
- Hamouz, P., Soukup, J., Štípek, K., Balík, J., & Černý, J. (2006). *Precizní zemědělství. Vědecký výbor fyto-sanitární a životního prostředí*. Praha.
- Hassanalain, M., & Abdelkefi, A. (2017). Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. *Progress in Aerospace Sciences*, 91(May), 99–131.
- Henten, E. J. van, Goense, D., & Lokhorst, C. (2009). *Precision Agriculture '09* (1st ed.). Wageningen, the Netherlands: Wageningen Academic Pub.
- Honkavaara, E., Saari, H., Kaivosoja, J., Pölönen, I., Hakala, T., Litkey, P., ... Pesonen, L. (2013). Processing and assessment of spectrometric, stereoscopic imagery collected using a lightweight UAV spectral camera for precision agriculture. *Remote Sensing*, 5(10), 5006–5039.
- Chen, J. M., & Black, T. A. (1992). Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant, Cell & Environment*, 15(4), 421–429.
- International Civil Aviation Organization. (2011). *Unmanned Aircraft Systems (UAS)*. Quebec, Canada: ICAO.
- Issod, C. S. (2017). *Getting Started with Hobby Quadcopters and Drones* (1st ed.). United States: Createspace Independent Publishing Platform.
- Kaplan, H. (2007). *Practical Applications of Infrared Thermal Sensing and Imaging Equipment* (3rd ed.). Washington: SPIE Press.
- Karas, J., & Tichý, T. (2016). *Drony* (1. vyd.). Brno: Computer Press.

- Khanal, S., Fulton, J., & Shearer, S. (2017a). An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 139, 22–32.
- Khanal, S., Fulton, J., & Shearer, S. (2017b). An overview of current and potential applications of thermal remote sensing in precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 139, 22–32.
- Komeščíková, P. (2006). *Vegetační indexy*. Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem.
- Krebs, C. J. (2008). *The Ecological World View* (1st ed.). California: University of California Press.
- Kubašáková M., Smutný V., Lukas V., W. J. (2012). Evaluation heterogeneity of selected weeds species. In *Conference MendelNet* (pp. 111–118). Brno: Mendel University in Brno.
- Laudien, R., Bareth, G., & Doluschitz, R. (2004). Comparison of remote sensing based analysis of crop diseases by using high resolution multispectral and hyperspectral data – case study: Rhizoctonia Solani in sugar beer. *Proc. 12th Int. Conf. on Geoinformatics – Geospatial Information Research: Bridging the Pacific and Atlantic*, (7–9 June), 670–676.
- Lillesand, T. M., Kiefer, R. W., & Chipman, J. W. (2004). *Remote Sensing and Image Interpretation* (5th ed.). New York.
- Liu, K., Zhou, Q., Wu, W., Xia, T., & Tang, H. (2016). Estimating the crop leaf area index using hyperspectral remote sensing. *Journal of Integrative Agriculture*, 15(2), 475–491.
- Lukas, V., Ryant, P., Neudert, L., Dryšlová, T., Gnip, P., & Smutný, V. (2012). *Stanovení a optimalizace diferencovaných dávek dusíkatých hnojiv v precizním zemědělství* (1. vyd.). Brno: Mendelova univerzita v Brně.
- Marshall, D. M., Barnhart, R. K., Hottman, S. B., Shappee, E., & Most, M. T. (2011). *Introduction to Unmanned Aircraft Systems* (1st ed.). London: CRC Press.
- Mondal, P., & Basu, M. (2009). Adoption of precision agriculture technologies in India and in some developing countries: Scope, present status and strategies. *Progress in Natural Science*, 19(6), 659–666.
- Müller, K., Böttcher, U., Meyer-Schatz, F., & Kage, H. (2008). Analysis of vegetation indices derived from hyperspectral reflection measurements for estimating crop canopy parameters of oilseed rape (*Brassica napus* L.). *Biosystems Engineering*, 101(2), 172–182.
- Naresh, R. K., Kumar, Y., Chauhan, P., & Kumar, D. (2012). Role of precision farming

for sustainability of rice-wheat cropping system in western indo gangetic plains. *International Journal of Life Sciences Biotechnology and Pharma Research*, 1(4), 87–97.

- Paper, C., & Michas, S. (2015). Precision Agriculture – Comparison and Evaluation of Innovative Very High Resolution (UAV) and Landsat Data. In *In Proceedings of the 7th International Conference on Information and Communication Technologies in Agriculture, Food and Environment* (pp. 376–386).
- Paxton, K. W., Mishra, A. K., Chintawar, S., Roland, K., Larson, J. A., English, B. C., ... Martin, W. (2011). Intensity of Precision Agriculture Technology Adoption by Cotton Producers. *Agricultural and Resource Economics Review*, 40(1), 133–144.
- Pierce, F. J., & Nowak, P. (1999). Aspects of Precision Agriculture. *Advances in Agronomy*, 67, 1–85.
- Rango, A., Laliberte, A., Steele, C., Herrick, J. E., Bestelmeyer, B., Schmutge, T., ... Jenkins, V. (2006). Research Article: Using Unmanned Aerial Vehicles for Rangelands: Current Applications and Future Potentials. *Environmental Practice*, 8(3), 159–168.
- Rasmussen, J., Nielsen, J., Garcia-Ruiz, F., Christensen, S., & Streibig, J. C. (2013). Potential uses of small unmanned aircraft systems (UAS) in weed research. *Weed Research*, 53(4), 242–248.
- Rokhmana, C. A. (2015). The Potential of UAV-based Remote Sensing for Supporting Precision Agriculture in Indonesia. *Procedia Environmental Sciences*, 24, 245–253.
- Ryant, P. (2001). *Precizní zemědělství*. Brno: Mendelova univerzita v Brně.
- Sankaran, S., Khot, L. R., Espinoza, C. Z., Jarolmasjed, S., Sathuvalli, V. R., Vandemark, G. J., ... Pavak, M. J. (2015). Low-altitude, high-resolution aerial imaging systems for row and field crop phenotyping: A review. *European Journal of Agronomy*, 70, 112–123.
- Sasao, A., & Shibusawa, S. (2000). Prospects and Strategies for Precision Farming in Japan. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 34(January), 233–238.
- Seelan, S. K., Laguet, S., Casady, G. M., & Seielstad, G. A. (2003). Remote sensing applications for precision agriculture: A learning community approach. *Remote Sensing of Environment*, 88(1–2), 157–169.
- Shahbazi, M., Théau, J., & Ménard, P. (2014). Recent applications of unmanned aerial imagery in natural resource management. *GIScience & Remote Sensing*, 51(4), 339–365.

- Stafford, J. V. (2000). Implementing Precision Agriculture in the 21st Century. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 76(3), 267–275.
- Steven, M. D. (1998). The sensitivity of the OSAVI vegetation index to observational parameters. *Remote Sensing of Environment*, 63(1), 49–60.
- Steven, M. D., Malthus, T. J., Baret, F., Hui, X., & Chopping, M. J. (2003). Intercalibration of vegetation indices from different sensor systems. *Remote Sensing of Environment*, 88(4), 412–422.
- Stoszek, J. (2009). Precision farming. Ostrava: VŠB-TU.
- Sun, D.-W. (2010). *Hyperspectral Imaging for Food Quality Analysis and Control* (1st ed.). London: Academic Press.
- Svatoňová, H., & Lauermann, L. (2010). *Dálkový průzkum Země - aktuální zdroj geografických informací* (1. vyd.). Brno: Masarykova univerzita.
- Škoda, V. (2014). *Možnosti využití technologií precizního zemědělství v zemědělském podniku*. Mendelova univerzita v Brně, Brno.
- Tang, H., & Li, Z.-L. (2014). *Quantitative Remote Sensing in Thermal Infrared* (1st ed.). Heidelberg: Springer Science & Business Media.
- Urbahs, A., Petrovs, V., Savkovs, K., Jakovlevs, A., & Bulanovs, V. (2008). Unmanned aerial vehicle design. *International Journal Machines, Technologies, Materials: Scientific-Technical Union of Mechanical Engineering*, (6–7), 60–61.
- Vilém Pechanec, Aleš Vávra, I. M. (2014). Využití UAV technologie pro získávání dat v precizním zemědělství na příkladu ploch s cukrovou řepou. *Listy Cukrovarnické a Řeparské*, 130(5–6), 162–165.
- Vojtěch, L., & Neudert, L. (2016). *Senzorové měření porostů zemědělských plodin pro variabilní aplikaci hnojiv a pesticidů* (1. vyd.). Brno: Mendelova univerzita v Brně.
- Williams, T. (2009). *Thermal Imaging Cameras: Characteristics and Performance* (1st ed.). Boca Raton: CRC Press.
- Xiongkui, H., Bonds, J., Herbst, A., & Langenakens, J. (2017). Recent development of unmanned aerial vehicle for plant protection in East Asia. *Agricultural and Biological Engineering*, 10(3), 18–30.
- Zemek F. et al., (2014). *Letecký dálkový průzkum Země : teorie a příklady hodnocení terestrických ekosystémů* (1. vyd.). Brno: Centrum výzkumu globální změny AV ČR.
- Zhang, C., & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. *Precision Agriculture*, 13(December), 693–712.
- Zhang, C., Walters, D., & Kovacs, J. M. (2014). Applications of low altitude remote

sensing in agriculture upon farmers' requests-A case study in northeastern Ontario, Canada. *PLoS ONE*, 9(11), 17–19.

Internetové zdroje:

A to Z About Active and Passive Remote Sensing. (2017, May). Retrieved July 30, 2017, from <http://grindgis.com/remote-sensing/active-and-passive-remote-sensing>

Agriculture - Efficient use of resources - see what grows. (2017). Retrieved June 26, 2017, from <https://www.multirotor.net/en/applications/agriculture>

arcdata.cz. (2017). Retrieved August 5, 2017, from <https://www.arcdata.cz/produkty/envi/envi-onebutton>

Borne, J. van den. (2015). Inspirational ideas: Precision farming- the right technology and sharing knowledge are key - European Commission. Retrieved June 26, 2017, from <https://ec.europa.eu/eip/agriculture/en/news/inspirational-ideas-precision-farming-right-technology-and-sharing-knowledge-are-key>

Brown, L. (2017). Types of Drones. Retrieved July 10, 2017, from <https://filmora.wondershare.com/drones/types-of-drones.html>

Cenia. (2016). Základní informace a princip DPZ. Retrieved July 10, 2017, from <http://copernicus.gov.cz/zakladni-informace-a-princip-dpz>

Corporation, Y. M. (2016). Precision Agriculture - Fazer. Retrieved June 26, 2017, from <https://www.yamahamotorsports.com/motorsports/pages/precision-agriculture-fazer>

doc.arcgis.com. (2017). Retrieved August 5, 2017, from <https://www.arcdata.cz/produkty/arcgis/desktopovy-gis/drone2map-for-arcgis>

Draganfly. (2008). An Introduction to Unmanned Aerial Vehicles (UAVs). Retrieved July 10, 2017, from <http://www.draganfly.com/blog/introduction-to-unmanned-aerial-vehicles-uavs/>

eBee Plus: senseFly SA. (2017). Retrieved June 26, 2017, from <https://www.sensefly.com/drones/ebec-plus.html>

GNSS / GPS Technology Differences | TerrisGPS. (2017). Retrieved June 25, 2017, from <http://www.terrisgps.com/gnss-gps-differences-explained/>

Grygar, J., Nejedi, T., & Kříž, O. (2017). UAV a drony. Retrieved July 10, 2017, from

<http://mensuro.cz/uav-a-drony/>

Harper, D. (2017). Drone. Retrieved July 10, 2017, from <http://www.etymonline.com/index.php?term=drone>

Homeland Surveillance and Electronics. (2015). Agriculture UAV drones. Retrieved July 10, 2017, from http://www.agricultureuavs.com/photos_multispectral_camera.htm

HoneyComb. (2017, December). HoneyComb. Retrieved August 6, 2017, from <http://www.honeycombcorp.com/contact/>

IoTcluster. (2016). Využití metody NDVI snímání zemědělských kultur v přesném zemědělství – IoT Cluster. Retrieved July 10, 2017, from <http://www.iotcluster.cz/vyuziti-metody-ndvi-snimkovani-zemedelskych-kultur-v-presnem-zemedelstvi/>

Krček, V. (2017). První zkušenosti se systémem ISARIA - Články - Agromanuál.cz. Retrieved June 26, 2017, from <https://www.agromanual.cz/cz/clanky/mechanizace/prvni-zkusenosti-se-systemem-isaria>

Křepelka, J. (2010). Precizní zemědělství a jeho přínosy. Retrieved July 10, 2017, from <http://zemedelec.cz/precizni-zemedelstvi-a-jeho-prinosy/>

Kumhála, F. (2017). O CPZ. Retrieved June 17, 2017, from <https://cpz.czu.cz/cs/>

Mai, T. (2017). What are passive and active sensors? Retrieved July 30, 2017, from http://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/outreach/funfacts/txt_passive_active.html

Nelson, S. J. (2015). Which satellite sensors (bands) are useful for nitrogen prediction in plants? Retrieved July 22, 2017, from https://www.researchgate.net/post/Which_satellite_sensors_bands_are_useful_for_nitrogen_prediction_in_plants

Nixon, A. (2017). Best Drones For Agriculture 2017: The Ultimate Buyer's Guide. Retrieved June 26, 2017, from <http://bestdroneforthejob.com/drone-buying-guides/agriculture-drone-buyers-guide/>

ProPhotoUAV. (2016, October). Types of Drones | What are the different variations and how do they work. Retrieved July 10, 2017, from <https://www.prophotouav.com/types-of-drones-different-variations/>

PrecisionHawk. (2017). PrecisionHawk. Retrieved August 6, 2017, from

<http://www.precisionhawk.com/team>

Rouse, M. (2016). Drone (unmanned aerial vehicle, UAV). Retrieved June 19, 2017, from <http://internetofthingsagenda.techtarget.com/definition/drone>

SenseFly. (2017). SenseFly. Retrieved August 6, 2017, from <https://www.sensefly.com/home.html>

Short, N. M. (2017). Hyperspectral imaging. In *Wikipedia*. Retrieved from https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Hyperspectral_imaging&oldid=786911790

Stevenson, A. (2014). Drones and the Potential for Precision Agriculture. Retrieved July 10, 2017, from <http://www.alltech.com/blog/posts/drones-and-potential-precision-agriculture>

VanderLeest, Z., Bergman, R., Darr, M., & Murphy, C. (2016). Choosing the Right Imagery: Best Management Practices for Color, NIR, and NDVI Imagery | Integrated Crop Management. Retrieved June 26, 2017, from <http://crops.extension.iastate.edu/cropnews/2016/05/choosing-right-imagery-best-management-practices-color-nir-and-ndvi-imagery>